

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE BANDA ANCHA
(1.2 A 1.6 GHz) CON ROTACIÓN SECUENCIAL PARA NUEVAS
ANTENAS DE REFERENCIA DE SISTEMAS GNSS**

Adolfo Company Lopesino
Tutor: Miguel Alejandro Salas Natera
Ponente: José Luís Masa Campos

DICIEMBRE 2020

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE BANDA ANCHA (1.2
A 1.6 GHz) CON ROTACIÓN SECUENCIAL PARA NUEVAS ANTENAS
DE REFERENCIA DE SISTEMAS GNSS**

AUTOR: Adolfo Company Lopesino
TUTOR: Miguel Alejandro Salas Natera
PONENTE: José Luís Masa Campos

Grupo de Radiofrecuencia, Antenas, Circuitos y Sistemas
Dpto. de Tecnologías Electrónicas y de Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Diciembre de 2020

Resumen (castellano)

Este Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño de una red de alimentación de banda ancha (1.2-1.6 GHz) con rotación secuencial a derechas, así como su integración con la antena de referencia diseñada en TFGs anteriores.

En la primera parte del TFG se realiza un estudio sobre diferentes estructuras en stripline compatibles que puedan ofrecer un amplio ancho de banda y una distribución de potencia equitativa para cuatro puertos de salida.

Se parte de los divisores del TFG de Juan Pedro [1] y se busca su optimización con Secciones de Schiffman y stubs en T. Posteriormente, se procede al estudio de redes compuestas por múltiples Branch-Lines como una Matriz de Butler o una red de híbridos en cascada. Por último, se diseña una arquitectura de red basada en la conexión de un acoplador híbrido Branch-Line y dos acopladores híbridos Rat-Race.

En la segunda parte del TFG se diseñan por separado los componentes de la red de alimentación y posteriormente se unifican. Para los circuitos por separado, se optimiza la respuesta del parámetro S_{11} y los parámetros de transmisión para entregar la misma potencia por los puertos de salida de los circuitos y minimizar la potencia en los puertos aislados. Además, los circuitos deben presentar una diferencia de fase de 90° para los puertos de salida en todo el ancho de banda.

Cuando se termina de diseñar los tres elementos, se procede a unificarlos mediante una estructura multicapa conectándolos con vías intermedias y conectores SMA. Dichas vías se modifican y se diseñan nuevas respecto a las del TFG anterior. Para saber en qué posiciones espaciales se tienen que colocar los puertos de salida de la red de alimentación, se ha tenido en cuenta la colocación de los puertos de entrada a la antena. De este modo, la colocación de la red de alimentación está profundamente ligada a estas coordenadas.

Por último, para la tercera parte del TFG, se procede a integrar la red de alimentación con el elemento radiante. Mediante la simulación se verifican los resultados de adaptación, fase, relación axial, VSWR y componentes copolar y contrapolar del diagrama de radiación.

Como conclusión se realiza una valoración de los resultados expuestos para los diferentes diseños de la red de alimentación, así como la red final y su integración con el elemento radiante.

Abstract (English)

This Bachelor Thesis consist on the design of a feeding network of wide bandwidth with right-handed sequence rotation, as well as its integration with the reference antenna designed in the previous Bachelor Thesis.

In the first part of the Bachelor Thesis a study is carried out on different compatible stripline structures that can offer a wide bandwidth and an equal power distribution for four output ports.

Starts from the power dividers designed by Juan Pedro in his Bachelor Thesis [1] and it is sought to be optimized with Schiffman Sections and T stubs. Subsequently, it is proceeded to the study of networks formed by multiple Branch-Lines as a Butler Matrix or waterfall hybrids couplers. Finally, a network architecture is designed based on the connection of a Branch-Line hybrid coupler and two Rat-Race hybrids couplers.

In the second part of the Bachelor Thesis the components of the feeding network are designed separately and then unified. For each circuit, the response off the S_{11} parameter and the transmisión parameters are optimized for the purpose of reach the same power distribution through the components output ports and minimize the power in the isolated ports. In addition, all circuits must have 90° phase difference in all bandwith for each output port.

When all circuits are already designed, then they will be unified by means of multilayer structure connecting then with internal vias and SMA connectors. This vias are modified and new ones are designed regarding to the previous Bachelor Thesis. To know in which spatial positions the output ports of the feeding network have to be placed the position of the antennas input ports have been taking into account. Thus, the placement of the feeding network is deeply linked to these coordenates.

Finally, for the third part off the Bachelor Thesis, the feeding network is integrated with de radiating element. Through simulation, the results of adaptation, phase, axial ratio, VSWR and copolar component and countercopolar component of the radiation pattern are verified.

In conclusión, an assessment is done for all the results displayed for the feeding network designs, final network design and integration between the network and the radiating element.

Palabras clave (castellano)

Red de alimentación, Branch-Line, Rat-Race, polarización circular a derechas, adaptación, potencia, fase, parámetros S, stub, divisores, Matriz de Butler, stripline, antena, array de antenas, elemento radiante, centro de fase, relación axial, componente copolar, componente contrapolar, sistemas GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, COMPASS, sistemas SBAS.

Keywords (inglés)

Feeding network, Branch-Line, Rat-Race, right circular polarization, adaptation, power, phase, S parameters, stub, dividers, Butler Matrix, stripline, antenna, antenna array, radiant element, phase center, axial ratio, copolar component, counter copolar component, GNSS systems, GPS, GLONASS, Galileo, COMPASS, SBAS systems.

Agradecimientos

Con estas líneas cierro una de las mejores etapas que he tenido en mi vida, en la cual he tenido la oportunidad de crecer como persona y me ha dado la oportunidad de conocer a personas increíbles que merecen la pena.

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis padres y a mi familia en general por apoyarme siempre en los buenos y no tan buenos momentos. En este tiempo ha habido épocas complicadas en las que la presión de los exámenes y prácticas ha sido alta, pero con esfuerzo, dedicación y apoyo todo se logra.

También me gustaría dar las gracias a mi tutor Miguel Salas por darme la oportunidad de hacer este TFG con él, así como a mi ponente José Luis Masa quien ha ayudado en cualquier cosa cuando lo he necesitado. Además, me gustaría agradecer a los profesores su dedicación y enseñanza, puesto que ahora echo la vista atrás y veo que los momentos de dificultad vividos han dado sus frutos para formarme como ingeniero.

Y, por último, pero no menos importante, dar las gracias a los compañeros y amigos que he hecho en la carrera. He conocido a mucha gente genial y varios de ellos forman algunos de mis mejores amigos. Han sido cinco años repletos de emociones, alegrías, estrés y aprendizaje. Puedo aprender de todos y cada uno de vosotros.

Estos cinco años habrán acabado, y la etapa se cierra, pero ahora se abre una nueva etapa en la cual espero mantener a esta gente genial y que la vida no deje de sorprenderme con lo mejor que tenga.

Espero que esta nueva etapa me siga haciendo crecer y brinde muchos éxitos en el futuro.

Muchas gracias a todos por permitirme caminar a vuestro lado en la vida.

Adolfo Company Lopesino

Octubre 2020

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte	3
2.1	Alcance de la tecnología.....	3
2.1.1	Origen de los sistemas GNSS.....	3
2.1.2	Actualidad de los sistemas GNSS y de aumento.....	4
2.1.2.1	Sistemas GNSS.....	4
2.1.2.2	Sistemas SBAS	6
2.2	Dispositivos utilizados.....	8
2.2.1	Antenas	8
2.2.2	Redes de alimentación.....	10
3	Diseño.....	13
3.1	Requisitos del sistema	13
3.2	Metodología de diseño	14
3.3	Propuesta de diseño de antena	15
3.4	Propuestas de arquitectura de red de alimentación.....	16
3.4.1	Híbrido Branch-Line con dos divisores de potencia	16
3.4.2	Matriz de Butler.....	16
3.4.3	Red de híbridos Branch-Line en cascada	17
3.4.4	Red de híbrido Branch-Line (90°) y dos híbridos Rat-Race (180°).....	18
4	Desarrollo	19
4.1	Aspectos teóricos.....	19
4.1.1	Acoplador híbrido Branch-Line.....	19
4.1.2	Acoplador híbrido Rat-Race.....	20
4.2	Diseño y verificación de los circuitos en ADS.....	21

4.2.1 Acoplador híbrido Branch-Line.....	21
4.2.2 Acoplador híbrido Rat-Race.....	23
4.2.3 Unión red de alimentación.....	25
4.3 Diseño y verificación de los circuitos en CST	27
4.3.1 Acoplador híbrido Branch-Line.....	28
4.3.2 Acoplador híbrido Rat-Race inferior.....	29
4.3.3 Acoplador híbrido Rat-Race superior.....	31
4.3.4 Unión red de alimentación.....	32
5 Integración, pruebas y resultados	35
6 Conclusiones y trabajo futuro.....	39
6.1 Conclusiones.....	39
6.2 Trabajo futuro	40
Referencias	41
Glosario	45
Anexos.....	XLVII
A Conceptos teóricos.....	XLVII
A.1 Teoría de antenas	XLVII
I. Definición de antena.....	XLVII
II. Diagrama de radiación.....	XLVII
III. Condición de campo lejano	XLVIII
IV. Polarización y relación axial.....	XLVIII
V. Centro de fases	XLIX
A.2 Teoría de redes de alimentación	XLIX
I. Parámetros S.....	XLIX
II. Línea de transmisión.....	L
III. VSWR.....	L
IV. Stripline	L
B Antenas GNSS comerciales.....	L
C Secciones de Schiffman.....	LII
D Teoría de Matriz de Butler y layout	LIX

E	Resultados red de híbridos en cascada	LX
F	Diseño de red final.....	LXIII
G	Vías de la red de alimentación.....	LXVII
H	Materiales del proyecto	LXVIII
I	Programas utilizados	LXVIII
J	Teoría de array de antenas	LXIX

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: SISTEMAS GNSS	5
FIGURA 2-2: BANDAS DE LOS SISTEMAS GNSS [4]	6
FIGURA 2-3: SISTEMAS SBAS [13].....	8
FIGURA 2-4: TIPOS DE ANTENAS GNSS	10
FIGURA 2-5: CIRCUITOS PRINCIPALES DEL TFG	11
FIGURA 2-6: TIPOS DE REDES DE ALIMENTACIÓN	12
FIGURA 3-1: ELEMENTOS DE LA ANTENA [1]	15
FIGURA 3-2: ESQUEMA BRANCH-LINE Y DIVISORES	16
FIGURA 3-3: ESQUEMA MATRIZ DE BUTLER.....	17
FIGURA 3-4: ESQUEMA DE RED BRANCH-LINE EN CASCADA.....	17
FIGURA 3-5: ESQUEMA DE ARQUITECTURA DE RED IMPLEMENTADA	18
FIGURA 4-1: BRANCH-LINE [15]	19
FIGURA 4-2: IMPEDANCIAS Y LONGITUDES DEL BRANCH-LINE.....	20
FIGURA 4-3: RAT-RACE [15]	21
FIGURA 4-4: LAYOUT BRANCH-LINE ADS	22
FIGURA 4-5: S11 BRANCH-LINE ADS	22

FIGURA 4-6: POTENCIA BRANCH-LINE ADS.....	22
FIGURA 4-7: FASE BRANCH-LINE ADS.....	23
FIGURA 4-8: LAYOUT RAT-RACES ADS	23
FIGURA 4-9: S11 RAT-RACES ADS	24
FIGURA 4-10: POTENCIA RAT-RACES ADS.....	24
FIGURA 4-11: FASE RAT-RACES ADS.....	25
FIGURA 4-12: LAYOUT RED UNIDA ADS.....	26
FIGURA 4-13: S11 RED UNIDA ADS	26
FIGURA 4-14: POTENCIA RED UNIDA ADS.....	27
FIGURA 4-15: FASE RED UNIDA ADS.....	27
FIGURA 4-16: S11 BRANCH-LINE CST.....	28
FIGURA 4-17: POTENCIA BRANCH-LINE CST	29
FIGURA 4-18: FASE BRANCH-LINE CST.....	29
FIGURA 4-19: S11 RAT-RACE INFERIOR CST.....	30
FIGURA 4-20: POTENCIA RAT-RACE INFERIOR CST	30
FIGURA 4-21: FASE RAT-RACE INFERIOR CST	30
FIGURA 4-22: S11 RAT-RACE SUPERIOR CST.....	31
FIGURA 4-23: POTENCIA RAT-RACE SUPERIOR CST.....	31
FIGURA 4-24: FASE RAT-RACE SUPERIOR CST.....	32
FIGURA 4-25: LAYOUT RED UNIDA CST	33
FIGURA 4-26: S11 RED UNIDA CST.....	33
FIGURA 4-27: POTENCIA RED UNIDA CST	33
FIGURA 4-28: FASE RED UNIDA CST	34
FIGURA 5-1: ANTENA GNSS	35
FIGURA 5-2: PARÁMETRO S11 Y CARTA SMITH.....	35

FIGURA 5-3: RELACIÓN AXIAL.....	36
FIGURA 5-4: VSWR.....	36
FIGURA 5-5: DIAGRAMA DE RADIACIÓN 3D.....	37
FIGURA 5-6: RADIACIÓN CAMPO E	37
FIGURA 0-1: DEFINICIÓN ANTENA [16]	XLVII
FIGURA 0-2: DEFINICIÓN CAMPO LEJANO [16].....	XLVIII
FIGURA 0-3: POLARIZACIÓN CIRCULAR A DERECHAS (RHCP) [4].....	XLVIII
FIGURA 0-4: PARÁMETROS S [17]	XLIX
FIGURA 0-5: ANTENAS COMERCIALES GNSS.....	LII
FIGURA 0-6: SECCIONES SCHIFFMAN Y STUB EN T [32].....	LII
FIGURA 0-7: ESQUEMÁTICO DOBLE SECCIÓN C	LIII
FIGURA 0-8: ESQUEMÁTICO STUB VERTICAL CON DOBLE SECCIÓN C.....	LIII
FIGURA 0-9: LAYOUT DIVISOR CON DOBLE SECCIÓN C.....	LIV
FIGURA 0-10: SIMULACIÓN DIVISOR CON DOBLE SECCIÓN C.....	LIV
FIGURA 0-11: ESQUEMÁTICO DIVISOR EN T	LV
FIGURA 0-12: ESQUEMÁTICO DIVISOR VERTICAL CON STUB T	LV
FIGURA 0-13: LAYOUT DIVISOR CON STUB T	LVI
FIGURA 0-14: SIMULACIÓN DIVISOR CON STUB T	LVI
FIGURA 0-15: ESQUEMÁTICO DIVISOR VERTICAL CON DOBLE STUB EN T	LVI
FIGURA 0-16: LAYOUT DIVISOR CON DOBLE STUB T	LVII
FIGURA 0-17: SIMULACIÓN DIVISOR CON DOBLE STUB T	LVII
FIGURA 0-18: ESQUEMÁTICO DIVISOR VERTICAL CON STUB T Y SECCIÓN C.....	LVIII
FIGURA 0-19: LAYOUT DIVISOR CON STUB T Y SECCIÓN C.....	LVIII
FIGURA 0-20: SIMULACIÓN DIVISOR CON DOBLE STUB T	LIX
FIGURA 0-21: LAYOUT MATRIZ DE BUTLER	LIX

FIGURA 0-22: ESQUEMÁTICO DE RED DE BRANCH-LINES EN CASCADA	LX
FIGURA 0-23: LAYOUT DE RED DE BRANCH-LINE EN CASCADA	LXI
FIGURA 0-24: ADAPTACIÓN RED DE BRANCH-LINES EN CASCADA	LXI
FIGURA 0-25: POTENCIA RED DE BRANCH-LINE EN CASCADA	LXII
FIGURA 0-26: DIFERENCIA DE FASE RED DE BRANCH-LINE EN CASCADA	LXII
FIGURA 0-27: ESQUEMÁTICO DEL BRANCH-LINE FINAL ADS	LXIII
FIGURA 0-28: ESQUEMÁTICO DEL ANILLO DEL RAT-RACE FINAL ADS	LXIII
FIGURA 0-29: ESQUEMÁTICO DEL RAT-RACE FINAL ADS.....	LXIV
FIGURA 0-30: ESQUEMÁTICO DE LA RED UNIDA FINAL ADS	LXIV
FIGURA 0-31: ESQUEMÁTICO DE LA RED UNIDA FINAL CON DESFASE PROGRESIVO ADS	LXV
FIGURA 0-32: ACOPLADORES HÍBRIDOS SEPARADOS CST.....	LXVI
FIGURA 0-33: INTERIOR DE LA RED FINAL UNIDA CST	LXVI
FIGURA 0-34: EXTERIOR DE LA RED FINAL UNIDA CST	LXVII
FIGURA 0-35: DISEÑO VÍAS CST	LXVIII

INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: RESUMEN CARACTERÍSTICAS SISTEMAS GNSS	6
TABLA 3-1: REQUISITOS DEL SISTEMA.....	13
TABLA 4-1: IMPEDANCIAS RESULTADO BRANCH-LINE.....	20
TABLA 5-1: RESULTADOS PARA CADA BANDA GNSS.....	38
TABLA 0-1: MATERIALES	LXVIII

1 Introducción

1.1 Motivación

Esta memoria de TFG consiste en la investigación y diseño de una red de alimentación de banda ancha que abarque las frecuencias de las portadoras de las bandas de trabajo de todos los sistemas GNSS, tanto actuales (GPS y GLONASS) como futuros (Galileo y COMPASS).

Con el surgimiento de los Sistemas de Navegación por Satélite (GNSS), comienza una nueva forma de plantear los conflictos bélicos con las ventajas añadidas de la localización aliada y enemiga. Posteriormente, cuando se habilita a la sociedad el acceso a esta tecnología, se cambia la forma de viajar (tanto por carreteras como en la aviación y marítimos) permitiendo que cualquier destino sea más accesible.

Los sistemas GNSS están en continuo avance debido a que cada día se utilizan en muchas más tareas diarias de la vida de las personas. El interés por la geolocalización ya no solo se centra en el desplazamiento de un lugar a otro, sino también en potenciar la visión que se tiene de un terreno para la agricultura, el rastreo de movimientos de personas para controlar flujos de población en etapas de enfermedades, el despliegue continuo de drones para múltiples tareas, el inicio de las Smart Cities con toda la conectividad de dispositivos IoT que requieren de localización, etc. Por todo ello, los países están desarrollando sus propios sistemas de navegación por satélite con el fin de lograr independencia tecnológica en un área que está creciendo de una forma exponencial, además de querer mejorar las prestaciones actuales de los sistemas GNSS desplegados.

En TFGs anteriores de Adrián [2] y María [3] se analizó y diseñó una antena capaz de operar en el rango de frecuencias de los sistemas de navegación, estudiando la respuesta frecuencial y el ancho de haz de la antena.

En el TFG de Juan Pedro [1] se mejoró la respuesta de la antena implementando una cavidad. Además, se añadieron una serie de dipolos para eliminar la superposición de corrientes y tener la posibilidad en un futuro de integrar la antena en un array. Por último, se diseñó una red de alimentación para dotar de la polarización circular a derechas a la antena.

En este TFG se rediseña completamente la red ya que se necesitan estructuras de un mayor ancho de banda para permitir que la antena opere correctamente en todas las frecuencias del ancho de banda estudiado (1.2-1.6 GHz). Tras la simulación conjunta, se tiene que obtener un resultado correcto de adaptación, fase, relación axial y polarización para los requisitos de sistemas GNSS. En concreto, las frecuencias más difíciles de integrar en la operabilidad de la antena son las que se encuentran en los extremos de la banda, que corresponden al sistema Galileo, el futuro sistema GNSS desarrollado por Europa.

El proyecto de antena surge de la necesidad de diseñar nuevos elementos operativos para estaciones de referencia GNSS que sean capaces de operar con cualquiera de las constelaciones actuales y futuras. Se requiere un ancho de banda que abarque todas las frecuencias de las portadoras de las bandas. Para ello, la antena tiene que estar alimentada por una red que dote al elemento radiante con una polarización RHCP en todo el rango de frecuencias de operación.

*Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación
secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS*

Por este motivo se ha decidido realizar este TFG, continuando el proyecto de la antena de recepción para nuevas estaciones de referencia GNSS.

1.2 Objetivos

En este TFG se plantean los siguientes objetivos:

- Investigar estructuras de amplio ancho de banda compatibles para la red de alimentación.
- Diseñar y optimizar la red de alimentación para conseguir un buen resultado de adaptación y distribución de potencia. La potencia tiene que ser equitativa en cada puerto de entrada a la antena. La fase de los puertos de salida de la red debe presentar una rotación secuencial a derechas para dotar a la antena de una polarización RHCP para la recepción de señales GNSS. Esta rotación de fase debe aplicarse para el ancho de banda de 1.2 GHz a 1.6 GHz.
- Integrar la red de alimentación con la antena diseñada previamente. Extraer los resultados de adaptación, componentes copolar y contrapolar, relación axial, VSWR y desfase secuencial en el ancho de banda de 1.2 GHz a 1.6 GHz.
- Fabricar el elemento radiante y la red de alimentación y medir la antena resultado en la cámara anecoica. Analizar los datos de la medición.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Se expone en qué consiste el TFG, los objetivos del mismo y la organización de la memoria.
- Capítulo 2: En este capítulo se expone el estado del arte. Se comenta el contexto histórico y actual de los sistemas de navegación, los diferentes tipos de antenas que se utilizan para GNSS y redes de alimentación habituales utilizadas.
- Capítulo 3: Se indica la propuesta de diseño de la antena del proyecto y se muestran diferentes esquemas de arquitecturas de red estudiadas para conseguir el objetivo de rotación secuencial para un amplio ancho de banda.
- Capítulo 4: Se desarrolla el diseño de la red de alimentación final y se muestran los resultados principales del proyecto, indicando los circuitos finales que se han diseñado y sus simulaciones.
- Capítulo 5: Se analiza la integración de la red de alimentación con el elemento radiante y su correspondiente simulación para poder comprobar si se cumplen los objetivos marcados.
- Capítulo 6: Se lanzan las conclusiones del TFG tras el trabajo de investigación, diseño y verificación. Se muestran líneas futuras para mejorar el proyecto y continuar su avance.

2 Estado del arte

Este capítulo está dividido en dos partes. En la primera parte, se pondrá en contexto histórico el origen de este tipo de tecnología, indicando las necesidades por las que nacieron los Sistemas Globales de Navegación por Satélite y a partir de qué momento estas aplicaciones pasaron a formar parte de la sociedad para el bien común. Se explicará qué son los sistemas GNSS, qué tipos de sistemas hay en la actualidad y cuáles están en desarrollo y sus principales características. Además, se comentarán las principales antenas que se pueden encontrar en la actualidad en los satélites.

En la segunda parte del capítulo se explicarán los conceptos base de la teoría física y matemática en la que está basada esta tecnología. Se comentarán conceptos importantes como la definición de una antena, tipos de antenas existentes y tipos de redes de alimentación. A continuación, se explicarán los parámetros de diseño más relevantes a la hora de diseñar antenas y redes de alimentación, y su impacto en el funcionamiento de la antena.

2.1 Alcance de la tecnología

Antes de comenzar a estudiar las propuestas de diseños del TFG y su análisis para cumplir los requerimientos de una antena GNSS, es necesario realizar una breve introducción respecto a los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS).

Se entiende por GNSS (Global Navigation Satellite System) a todo el sistema pasivo de constelaciones de satélites y receptores que proporcionan un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global, independientemente de las condiciones atmosféricas y orográficas [4].

A continuación, se procede a explicar tanto el origen de esta tecnología, el por qué se empezó a desarrollar y cuáles eran las principales aplicaciones en sus inicios, como los conceptos teóricos relevantes de diseño.

2.1.1 Origen de los sistemas GNSS

Desde los inicios, la geolocalización es una herramienta indispensable para la exploración y la mejora de las actividades de las personas. Comenzó con diferentes técnicas de posicionamiento como la localización del Sol a cada hora, la orientación nocturna mediante la Estrella Polar, posteriormente el uso de mapas y brújulas, etc. Pero con el avance de la tecnología, fueron surgiendo nuevas formas de geolocalización mucho más precisas.

El primer sistema de navegación por satélite que consta fue diseñado por Estados Unidos para propósito militar. Dicho sistema es el conocido GPS (Global Positioning System) y tuvo origen en el año 1978. El sistema GPS, como se comenta anteriormente, empezó con uso exclusivo militar, pero a mediados de los años 80, comenzó a habilitarse el uso a la sociedad. Aun así, el sector militar disponía de una mayor eficacia en la geolocalización que la sociedad, permitiendo a esta un error de cálculo mayor que en los dispositivos y aeronaves militares.

2.1.2 Actualidad de los sistemas GNSS y de aumento

A continuación, se comentan los diferentes sistemas de geolocalización que se pueden encontrar implementados. Hay que diferenciar entre dos tipos diferentes de sistemas: los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) y los sistemas de aumento. Cabe destacar que no todos los sistemas de navegación que se contemplan hoy en día en los GNSS están operativos. Algunos de estos sistemas están en proceso de desarrollo.

2.1.2.1 Sistemas GNSS

- **GPS (Global Positioning System):** es el sistema desarrollado por Estados Unidos y se compone de 24 satélites que se desplazan en seis órbitas cuasi-circulares con una inclinación de 55° a unos 20,000 km. Por cada órbita hay cuatro satélites y cada uno completa la órbita dos veces al día, lo que permite que en cada momento y casi en cualquier punto de la superficie terrestre se pueda contactar al menos con ocho satélites del sistema.

La banda del espectro de radiofrecuencia que se utiliza para este sistema es la banda L. En concreto, las bandas son la L1 (con la frecuencia de la portadora a 1575.42 MHz), la banda L2 (con la frecuencia de la portadora a 1227.60 MHz) y la banda L5 (con frecuencia de la portadora a 1176.45 MHz), la más reciente de las tres bandas [5] [6].

- **GLONASS:** es el sistema desarrollado por la Unión Soviética y se compone también de 24 satélites operativos y 1 en fase de pruebas que se desplazan en tres órbitas elípticas con una inclinación de $64^\circ 8'$, a una distancia de 19,140 km. Por cada órbita hay ocho satélites y cada uno completa la órbita dos veces al día. El periodo de revolución es muy similar al de los satélites del sistema GPS.

La banda del espectro de radiofrecuencia que se utiliza para este sistema es la banda L. En particular, esta banda L también está dividida en otras tres bandas: la banda L1 (con la frecuencia de la portadora a 1600.995 MHz), la banda L2 (con la frecuencia de la portadora a 1248.06 MHz) y la banda L3 (con la frecuencia de la portadora a 1202.035 MHz) [7] [8].

- **Galileo:** el sistema Galileo es uno de los sistemas que están en proceso de desarrollo y no están operativos. Este sistema es un proyecto de Europa para poder diseñar y utilizar su propio sistema global de navegación por satélite y así dejar de depender del sistema estadounidense GPS. Además de querer independizar su tecnología en este área, busca mejorar la respuesta de geolocalización del GPS, asumiendo un error mucho menor que el sistema americano.

Este sistema estará formado por un total de 30 satélites de órbita media distribuidos en tres órbitas circulares con una inclinación de 56° y a una distancia de 23,222 km del planeta. Los satélites estarán distribuidos de forma equitativa en las tres órbitas, haciendo un total de 10 satélites por órbita. En cada órbita, 9 de esos satélites estarán operativos y habrá uno de repuesto que también estará transmitiendo.

La banda del espectro radioeléctrico que ha sido asignada para este proyecto es la banda E. Esta banda está dividida en otras cinco bandas: la banda E1 (con frecuencia de la portadora a 1575.420 MHz), la banda E6 (con la frecuencia de la portadora a

1278.750 MHz), la banda E5 (con la frecuencia de la portadora a 1191.795 MHz), la banda E5a (con la frecuencia de la portadora a 1176.450 MHz) y la banda E5b (con la frecuencia de la portadora a 1207.140 MHz) [9] [10].

- **COMPASS:** el sistema COMPASS, o también conocido como BeiDou, es el sistema GNSS que está en proceso de desarrollo por parte de China. Al igual que Europa, China también busca tener una red propia de satélites y receptores para su propio uso, dejando la dependencia de esta tecnología con Estados Unidos.

Este sistema contará con 35 satélites, de los cuales hay 5 geoestacionarios y 30 no geoestacionarios. Respecto a los 30 satélites geoestacionarios, 27 de ellos son de órbita media y 3 de ellos de órbita geosincronizada inclinada. Estos satélites estarán distribuidos en una órbita geoestacionaria, tres órbitas medias y tres órbitas geosincronizadas con cobertura global.

La banda de frecuencias asignada a este sistema es la banda B. Esta banda se divide a su vez en las bandas B1I (con frecuencia de la portadora a 1561.098 MHz), B1C (con frecuencia de la portadora a 1575.42 MHz), B2a (con una frecuencia de la portadora a 1176.45 MHz) y la banda B3 (con una frecuencia de la portadora a 1268.520 MHz) [11] [12].

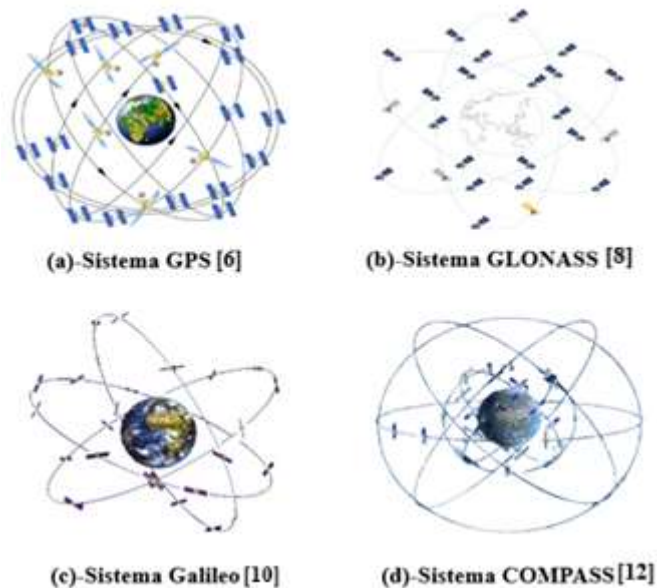


Figura 2-1: Sistemas GNSS

A continuación, se muestra una tabla comparativa a modo resumen entre los sistemas GNSS vistos anteriormente con sus características principales. En la Tabla 2-1 se encuentran características importantes en relación a cómo se disponen (o dispondrán) los satélites para proporcionar la cobertura adecuada, en qué bandas de frecuencia trabajan dichos satélites, cuáles son las frecuencias de las portadoras en las que se transmite la información de geoposicionamiento y qué tipos de modulaciones utilizan los sistemas.

Tabla 2-1: Resumen características sistemas GNSS

GNSS	GPS	GLONASS	Galileo	COMPASS
<i>Nº Satélites</i>	24	24	30	35
<i>Nº Órbitas</i>	6	3	3	3 MEO 3 IGSO 1 GEO
<i>Radio de órbita</i>	26,560 km	25,508 km	29,601 km	MEO/IGSO/GEO
<i>Periodo de revolución</i>	11h 57.96 min	11h 15.73 min	14h 4.75 min	?
<i>Inclinación</i>	55°	64.8°	56°	55° (MEO)
<i>Bandas</i>	L1, L2, L5	L1, L2, L3	E1, E5, E5a, E5b, E6	B1I, B1C, B2a, B3
<i>Frecuencia de portadora</i>	L1: 1.57542 GHz L2: 1.22760 GHz L5: 1.17645 GHz	L1: 1.600995 GHz L2: 1.24806 GHz L3: 1.202035 GHz	E1: 1.575420 GHz E5: 1.191795 GHz E5a: 1.176450 GHz E5b: 1.207140 GHz E6: 1.278750 GHz	B1I: 1.561098 GHz B1C: 1.57542 GHz B2a: 1.17645 GHz B3: 1.268520 GHz
<i>Modulación</i>	BPSK BOC(1,1) BOC(10,5)	BPSK	BPSK BOC	QPSK(2) QPSK(10) BPSK(10)+BPSK(2)

Por lo que se puede resumir que teniendo en cuenta todas las bandas, tanto las nuevas como las principales, el espectro radioeléctrico en el que se encuentran las señales portadoras de los sistemas globales de navegación por satélite es el que puede observarse en la Figura 2-2.

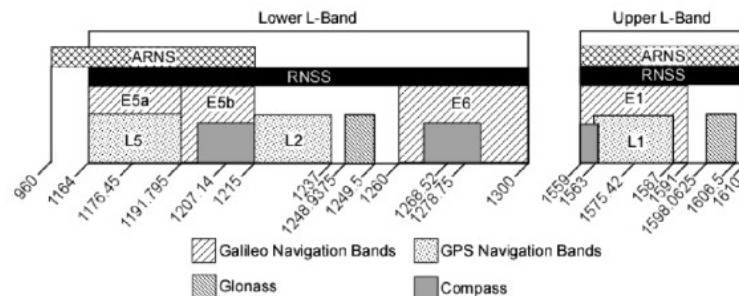


Figura 2-2: Bandas de los sistemas GNSS [4]

2.1.2.2 Sistemas SBAS

Por otro lado, existen otro tipo de sistemas denominados Sistemas SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems). Estos sistemas de aumento complementan a los GNSS proporcionando una mejora de la disponibilidad de las señales GNSS, la integridad de los datos transmitidos y la precisión en la geolocalización. Estas características son especialmente importantes cuando se utilizan los sistemas de geolocalización para misiones de gran importancia tales como la aviación, la geolocalización de naves marítimas en entornos difíciles de navegar o las propias misiones militares.

- La mejora de la precisión se consigue haciendo uso de áreas amplias de correcciones para los errores producidos por la Ionosfera y las órbitas de los satélites.

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

- La mejora de la integridad se consigue realizando una detección precoz de errores en las señales de los satélites y alertar a los receptores de no utilizar los satélites que están fallando.
- La mejora de la disponibilidad se consigue utilizando un mayor rango de señales para cada satélite de los sistemas SBAS.

Los sistemas SBAS están compuestos por estaciones de referencia, satélites geoestacionarios, estaciones maestras y estaciones de enlace ascendente. Las estaciones base que están distribuidas geográficamente toman datos de señales de un satélite GNSS y los envían a las estaciones maestras, las cuales generan las áreas amplias de corrección. Estas correcciones se envían a las estaciones de enlace ascendente y estas a su vez, las envían a los satélites para la retransmisión en la banda que trabaja el sistema GNSS. Estos satélites transmiten información de la integridad y precisión del sistema a todos los receptores que se encuentran dentro de la área amplia generada por las estaciones maestras.

Para asegurar que el sistema de aumento funciona correctamente se busca dotar de redundancia a este mismo. Hay al menos dos satélites geoestacionarios para cada usuario del sistema SBAS, por lo que si un satélite falla, hay al menos otro que está operando correctamente [4].

Al igual que pasaba con los sistemas GNSS, hay una serie de sistemas SBAS que están en operación o siendo desarrollados por distintos países con el objetivo de potenciar las características del sistema GNSS que utiliza cada uno. Estos sistemas son los siguientes:

- ❖ **WAAS:** el sistema WAAS (Wide Area Augmentation System) comenzó siendo desarrollado por el Departamento de Transporte y la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos en 1994. Actualmente, este sistema de aumento proporciona cobertura a prácticamente Estados Unidos al completo, Canadá y Centro-América [13].
- ❖ **EGNOS:** el sistema EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) es el sistema de aumento que ha sido desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés). Dicho sistema empezó a estar operativo en el año 2005 [13].
- ❖ **MSAS:** el sistema MSAS (Multifunctional Satellite-Based Augmentation System) es el sistema desarrollado por Japón cuyo servicio entró en funcionamiento en el año 2005, al igual que EGNOS [13].
- ❖ **GAGAN:** el sistema GAGAN (GPS and Geoaugmented Navigation) es el sistema desarrollado por India cuyas certificaciones de direccionamiento de señales y precisión han sido adquiridas en los años 2013 y 2015 respectivamente [13].
- ❖ **SNAS:** el sistema SNAS (Satellite Navigation Augmentation System) está en proceso de desarrollo por China [13].
- ❖ **WADGPS:** el sistema WADGPS (Wide Area Differential Global Positioning System) está en proceso de desarrollo por Corea del Sur [13].
- ❖ **SDCM:** el sistema SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring) está en proceso de desarrollo por Rusia [13].

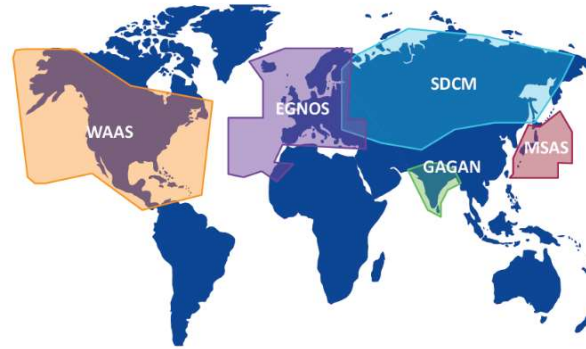


Figura 2-3: Sistemas SBAS [13]

2.2 Dispositivos utilizados

En este apartado se comentan los diferentes tipos de antenas que se utilizan hoy en día para transmitir información y los tipos de redes que se diseñan para alimentar estas antenas. En el anexo B se muestran algunas de las antenas comerciales más utilizadas en el ámbito de los sistemas GNSS y algunas de las empresas que diseñan esta tecnología.

2.2.1 Antenas

- **Antena FRPA:** las antenas FRPA son antenas receptoras que se utilizan principalmente en el ámbito militar y de la aviación. Estas antenas tienen un patrón omnidireccional en la parte superior, permitiendo tener visibilidad de al menos cuatro satélites para ser capaz de triangular y obtener unas coordenadas correctas. Además, estas antenas son usadas principalmente por ser resistentes frente al multitrayecto de señales, teniendo un buen ratio front-to-back y ganancia pequeña para ángulos de elevación reducida en el horizonte de la antena, donde los efectos del multitrayecto son mayores [4].
- **Antena Microstrip:** las antenas microstrip son antenas impresas y son las que más se utilizan para aplicaciones de navegación por satélite. Esto se debe al reducido coste de fabricación, su capacidad de ser integrada en casi cualquier superficie, la capacidad de alcanzar los requerimientos de diseño necesarios para los sistemas GNSS (en especial la facilidad en alcanzar una polarización circular a derechas) y la disponibilidad de generar arrays de antenas y otras estructuras que permitan alcanzar un requerimiento necesario. Las antenas microstrip se imprimen sobre sustrato dieléctrico con unas características eléctricas específicas a tener en cuenta en el diseño y se suelen utilizar en dispositivos móviles, aviación, etc. [4].
- **Antena de hélice cuadrifilar:** las antenas QHA (por sus siglas, Quadrifilar Helix Antenna) se componen de un array de cuatro antenas resonantes helicoidales envueltos alrededor de un cilindro, con un ángulo de paso concreto y en cuadratura para formar un haz amplio de polarización circular a derechas. Se puede modificar su tamaño dependiendo del tipo de sustrato eléctrico que se utilice, además de poder fabricarse de forma impresa para reducir costes. El uso de este tipo de antena es común en los móviles y en otro tipo de receptores [4].

- **Antena de ranura hexafilar:** este tipo de antenas son una variación de las QHA, de tal forma que se compone de seis ranuras resonantes de longitudes $\lambda/4$ las cuales se enrollan en media vuelta sobre una lámina cilíndrica. Estas antenas proporcionan la diferencia de fase necesaria para obtener una polarización circular a derechas, además de resistencia frente a las señales multitrayecto [4].
- **Antena Leaky-wave:** este tipo de antenas son de onda progresiva. El funcionamiento de estas antenas consiste en la inserción de ranuras en un medio guiado (por ejemplo, guías de onda) para poder propagar mediante fugas la radiación de la antena [14].
- **Antenas de torniquete plana y caída:** las antenas cruzadas son la versión en tecnología planar de las antenas bicónicas. Para dotar a la antena de una polarización RHCP se alimentan equitativamente en amplitud y cuadratura en fase (de 0° a 90°) a pares de dipolos cruzados, dos a dos, en el plano xy. Para conseguir la diferencia de fase de 90° en un amplio ancho de banda, es común utilizar una red de alimentación balun. Por debajo se dispone de un plano de masa a una altura óptima para que la polarización LHCP que se genera en dirección a la componente contrapolar, se refleje y cambie la polarización a una RHCP, sumándose a la de la dirección copolar [4].
- **Antenas helicoidales:** este tipo de elementos radiantes pertenecen al grupo de antenas direccionales. Existen dos tipos de antenas helicoidales: las antenas de hélice de modo axial cilíndricas, las cuales se caracterizan por tener un amplio ancho de banda y alta ganancia en la dirección de apuntamiento pero un reducido ancho de haz, y las antenas de hélice de perfil bajo hemisféricas, las cuales se caracterizan por proporcionar una mayor área de cobertura a costa de una menor ganancia [4].
- **Antena Helibowl:** estas antenas también son direccionales y constan de un reflector en forma de cuenco que se excita mediante una antena helicoidal situada en el centro del reflector [4].
- **Antena de hélice hemisférica:** las antenas de hélice hemisféricas son una variante de las antenas helicoidales para conseguir una buena relación axial sobre un ancho de haz mayor y así conseguir una respuesta óptima cuando se obtienen señales de cuatro o más satélites con ángulos de visión muy diferenciados [4].
- **Antenas reflectoras de alta ganancia:** las antenas reflectoras son un tipo de antenas direccionales que cada vez se utilizan más para monitorizar la calidad de señal de los satélites. Además, se utilizan frecuentemente para identificar señales interferentes o anomalías en la potencia de las señales transmitidas debido a errores de hardware de los satélites [4].
- **Array de antenas:** las agrupaciones de antenas, o más conocidas como array de antenas, constan de replicar un elemento radiante (pueden ser tanto antenas en tecnología planar como antenas direccionales con reflectores u otros tipos de antenas) N veces para conseguir una mayor ganancia y conformar un diagrama de radiación para favorecer direcciones de apuntamiento y minimizar direcciones interferentes. En el anexo J se comenta con mayor profundidad cómo funcionan los arrays de

antenas. Este tipo de estructuras de antenas son muy utilizados en las comunicaciones por satélite por la elevada calidad de señal que proporcionan [4].

- **Antena de anillos de choke:** las antenas 3D con geometría de chokes se diseñan implementando varios niveles de anillos conductores concéntricos en tres dimensiones sobre la antena con el fin de alcanzar una gran estabilidad de fase. Estas estructuras son difíciles de construir y muy delicadas, por lo que al fabricarla es necesario encapsularla para proteger la estructura de chokes. Estas antenas son principalmente usadas por su gran capacidad de rechazo al multitrayecto [2].

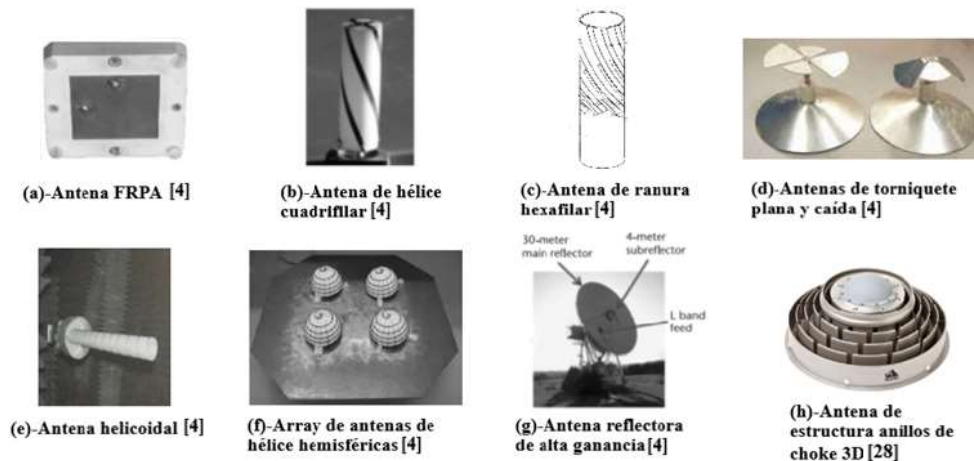


Figura 2-4: Tipos de antenas GNSS

2.2.2 Redes de alimentación

En esta sección se comentan diferentes tipos de redes de alimentación que se usan frecuentemente para las antenas de sistemas GNSS y cuáles son las características de potencia y fase de cada uno de ellos para tenerlos en cuenta a la hora de diseñar una red de alimentación de cara a unos requisitos concretos. Además, se indican cuáles son los elementos que se han utilizado para diseñar la red de alimentación del proyecto, indicando su matriz de parámetros S.

En primer lugar, se explican brevemente los dos elementos que forman la red de alimentación del proyecto. En la Figura 2-5 se muestran ambos circuitos fabricados en tecnología microstrip para mostrar su diseño real.

- **Branch-Line:** el híbrido de 90° o Branch-Line, es un tipo de acoplador direccional que proporciona una diferencia de fase de 90° entre dos de sus salidas. Es un elemento muy utilizado para el diseño de antenas GNSS debido a que se suele implementar en tecnología microstrip o stripline, la cual es una tecnología con un coste más reducido que otras, y proporciona unas prestaciones buenas en calidad de potencia transferida de un puerto a otros dos puertos y de diferencia de fase.

La potencia entra por uno de los puertos y, en función de las impedancias del circuito, sale la potencia por los dos puertos colocados en el lado opuesto a la entrada. El otro puerto queda aislado. La diferencia de fase da un resultado de 90° entre los dos puertos de salida y el ancho de banda está limitado entre un 10% y un 20%, pudiendo incrementarse al utilizar múltiples anillos en lugar de uno [15].

- **Rat-Race:** el híbrido de 180° o también denominado Rat-Race, es un circuito divisor de cuatro puertos que tiene una funcionalidad muy similar a la del Branch-Line.

En este caso, la señal entra por uno de los puertos y sale por los dos puertos más próximos a la entrada desfasando la señal 180° entre ambas salidas. El puerto más alejado a la entrada está aislado y no sale potencia por él. El ancho de banda que proporciona este circuito está entre el 20% y el 30% limitado en frecuencia, lo que le caracteriza como un circuito de amplio ancho de banda, pudiendo incrementarse al implementar más secciones o anillos simétricos [15].

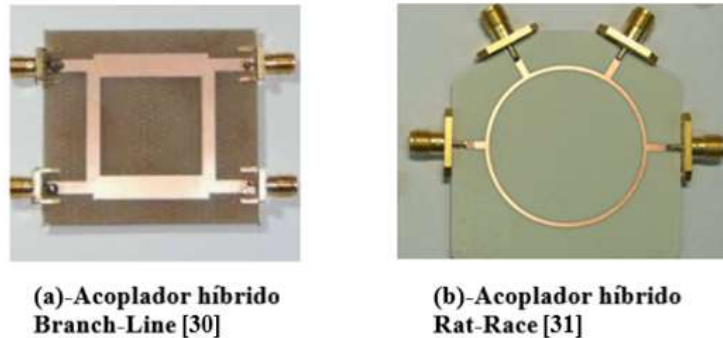


Figura 2-5: Circuitos principales del TFG

Este tipo de circuito es muy útil debido a sus altas prestaciones y su facilidad de ser integrado tanto en tecnología planar (microstrip o stripline) como en tecnología de guía de onda. En el cuarto capítulo de la memoria se comenta en mayor profundidad cómo se han diseñado ambos circuitos para el proyecto, analizando las características teóricas y las impedancias.

En segundo lugar, se describen brevemente otros tipos de redes de alimentación muy comunes para poder alimentar antenas, en particular las GNSS, con el fin de alcanzar unas características concretas.

- **Divisor en T:** el divisor de potencia en T es un divisor simple de tres puertos que se utiliza para dividir la potencia de un puerto de entrada a dos puertos de salida, o combinar la potencia entrante por dos puertos hacia un puerto de salida. La distribución de potencias de este divisor se puede hacer equipotencial o no, dependiendo de las impedancias de las líneas de transmisión. Para este circuito no se pueden tener todos los puertos adaptados. Es fácil de implementar y de medir en muchos tipos de tecnologías [15].
- **Divisor Wilkinson:** el divisor Wilkinson es un divisor en T pero con la peculiaridad de permitir que todos los puertos estén adaptados, disipándose las posibles reflexiones de las ondas en la resistencia que une ambas salidas del divisor. La distribución de potencia es equitativa y la implementación es sencilla en tecnología planar, lo que le permite ser un circuito muy utilizado cuando se busca buena adaptación sin reflexiones de onda a la entrada y distribución de potencia equitativa [15].
- **Balun:** el Balun es un elemento de tres puertos (una entrada y dos salidas) mediante el cual se consigue la misma tensión en ambas salidas, pero con una diferencia de

fase de 180° . Para ello se introduce una línea de transmisión por la salida desfasada de una longitud de $\lambda/2$. Este elemento se utiliza frecuentemente cuando se necesita alimentar a una antena de dipolo en tecnología impresa [16].

- **Matriz de Butler:** una Matriz de Butler es una red que se compone de 2^n entradas, 2^n salidas, $2^{n-1}\log_2(2^n)$ acopladores híbridos y desfasadores. El objetivo de esta red es emitir o recibir señales de un array de antenas aplicando un desfase, de tal forma que se producen 2^n haces. Se puede seleccionar qué antena se quiere utilizar para transmitir o de qué antena se quiere recibir la información [18].
- **Línea microstrip:** la línea microstrip es el elemento más sencillo para alimentar una antena. Consiste en implementar una línea de transmisión de una cierta longitud y anchura en tecnología planar microstrip, y dicha línea se conecta a la antena. La principal ventaja de este elemento es la capacidad de controlar de una forma muy precisa la impedancia de entrada al elemento radiante. Algunas desventajas de este diseño es la posibilidad de que exista radiación espuria y acoplo entre la línea de transmisión y la antena [14].
- **Sonda coaxial:** el método de alimentación mediante una sonda coaxial es similar al de la línea microstrip pero en este caso se utiliza una estructura coaxial. Las principales ventajas del uso de este elemento es la capacidad de controlar de una forma precisa la impedancia de entrada a la antena y evitar radiación espuria, pero dispone de un ancho de banda limitado. Es necesario soldar la estructura coaxial a la antena una vez se fabrican los elementos [14].

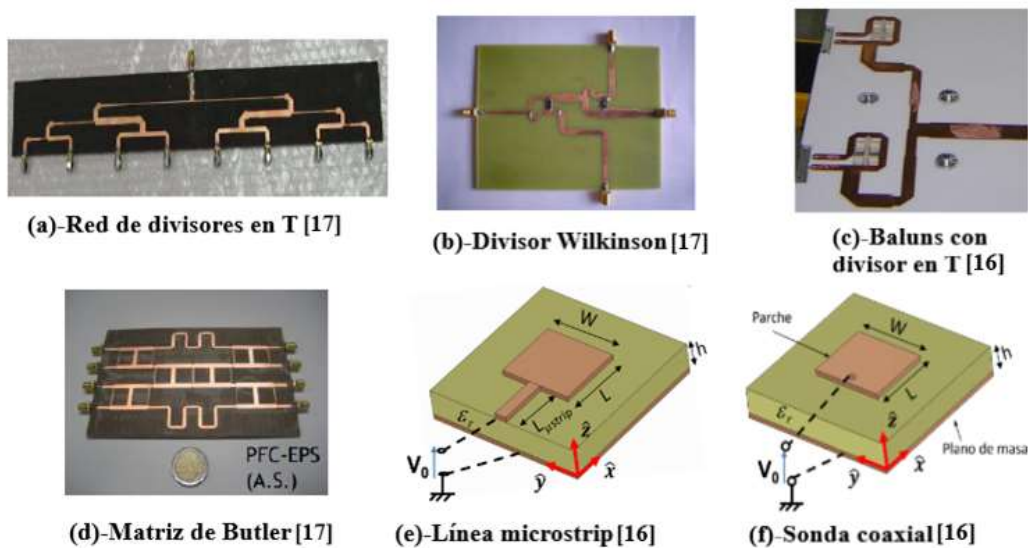


Figura 2-6: Tipos de redes de alimentación

3 Diseño

En este capítulo se abordan puntos clave para la comprensión del diseño de la antena de referencia GNSS y de su propia red de alimentación. El capítulo está dividido en tres subsecciones: requisitos del sistema, propuesta de diseño de antena y propuesta de diseño de red de alimentación.

En la primera subsección se muestran los requisitos del sistema para diseñar una antena receptora óptima para sistemas GNSS. Se encuentra una tabla con los parámetros clave que hay que analizar y se realiza una breve descripción de dichos parámetros.

En la segunda subsección se plantea cuál es la metodología de trabajo seguida en el proyecto partiendo del TFG anterior hasta conseguir mejorarlo y alcanzar los requisitos planteados al principio del TFG.

En la tercera subsección se contempla la propuesta de la antena realizada en TFGs anteriores para cumplir con los requisitos del sistema. Se analiza cada una de las diferentes partes de las que se compone la antena propuesta.

En la cuarta subsección de este capítulo se explican diferentes arquitecturas de redes de alimentación que se han estudiado y simulado para conseguir la rotación secuencial en todo el ancho de banda del diseño (1.2 GHz a 1.6 GHz) para dotar al elemento radiante de una polarización circular a derechas, requisito indispensable para la operativa de las antenas de navegación por satélite. Las simulaciones realizadas se encuentran en diferentes anexos, indicados en cada uno de los apartados de esta subsección.

3.1 Requisitos del sistema

En esta sección se muestran los requisitos que tiene que cumplir la antena GNSS diseñada para considerar que es una antena receptora óptima para estaciones de referencia de sistemas GNSS. En la Tabla 3-1 se muestran los parámetros más importantes del diseño.

Tabla 3-1: Requisitos del sistema

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valores</i>
<i>Tipo de polarización</i>	-	RHCP
<i>Frecuencia central</i>	GHz	1.4
<i>Ancho de banda</i>	GHz	1.2 – 1.6
<i>Bandas comprendidas</i>	-	E1, E2, E3, E4, E5, E6, L1, L2, L5, B1, B2, B3
<i>VSWR</i>	-	2:1
<i>Estabilidad centro de fases</i>	mm	<2
<i>Impedancia de conectores</i>	Ω	48
<i>Dimensiones</i>	mm	diámetro 370x180 altura

La antena está diseñada para operar tanto con los diferentes sistemas de navegación por satélite que existen (GPS y GLONASS), como los que se están desarrollando (Galileo y COMPASS). Estos sistemas tienen sus propias bandas de trabajo y sus propias frecuencias

portadoras, por tanto, se requiere que la banda de trabajo de la antena abarque todas las frecuencias (entre 1.2 GHz a 1.6 GHz con una frecuencia central a 1.4 GHz).

Además del ancho de banda requerido, se necesita que la polarización de la antena sea circular a derechas (RHCP) debido a que las antenas de los sistemas de navegación por satélite transmiten y reciben con esta polarización. Como la antena que se presenta en este proyecto es una antena receptora, se tiene que considerar la polarización circular a derechas para la recepción de la señal.

También es importante destacar los valores de relación de onda estacionaria y estabilidad de centro de fases. La relación de onda estacionaria (VSWR) tiene que ser 2:1 para no disponer de unas pérdidas de retorno elevadas. Respecto a la estabilidad de centro de fases, tiene que ser precisa en todo el rango de trabajo de la antena, requiriendo una estabilidad menor de dos milímetros para garantizar la precisión del sistema de navegación por satélite.

3.2 Metodología de diseño

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es diseñar una red de alimentación capaz de operar en las frecuencias portadoras dentro del ancho de banda de 1.2 GHz a 1.6 GHz, presentando para la antena unos valores correctos de directividad, adaptación, eficiencia, relación axial y con una polarización circular a derechas. Para ello, primero se parte de los diseños en ADS del TFG anterior de divisores con stub y Branch-Line.

El primer paso a realizar es un estudio en diferentes artículos y libros sobre cuáles son las opciones de mejorar el ancho de banda disponible para ambos divisores ya diseñados, el vertical y el horizontal, principalmente haciendo incidencia en las mejoras de los stubs. Una vez finalizado el estudio, se realizan diferentes comprobaciones y comparativas de las simulaciones en ADS sobre los divisores con el fin de concluir si se podrá alcanzar el ancho de banda con los divisores. Se verificará que el valor del coeficiente S_{11} se encuentre lo más bajo posible, siempre por debajo de -10 dB. Además, se requiere que los parámetros de transmisión sean equitativos en potencia y que la diferencia de fase sea de 180° entre cada par de puertos de salida de ambos divisores.

En segundo lugar, se realiza un estudio sobre diferentes arquitecturas de redes de alimentación que permitan alcanzar un amplio ancho de banda para toda la banda de frecuencias analizada y poder dotarla una polarización circular a derechas. En esta fase del proyecto, se plantea analizar una Matriz de Butler, una interconexión de acopladores Branch-Line en cascada y una interconexión de híbridos acopladores Rat-Race y Branch-line. El esquema resultante de cada arquitectura se procede a analizarlo en ADS y sacar conclusiones sobre su viabilidad, comparando los resultados de simulación. Estas conclusiones se basarán en los requisitos iniciales de la red: tener lo mejor adaptado posible el parámetro S_{11} (por debajo de -10 dB), disponer de un resultado similar de potencia entregada en los parámetros S de transmisión para cada salida a la antena y, además, tener un desfase de 90° en cada puerto de salida.

A continuación, se procede a diseñar en CST los mismos circuitos diseñados ya en ADS con las mismas medidas. Una vez implementados en CST se realizan comprobaciones y pequeñas variaciones para conseguir optimizar los circuitos en esta herramienta. Es necesario destacar que hay que establecer una longitud determinada en cada salida y en orden circular a derechas para dotar a la antena de la polarización RHCP. Tras diferentes

iteraciones de optimización de los circuitos por separado, se procede a unir los tres circuitos en una misma estructura de stripline capaz de ajustarse a las dimensiones máximas requeridas. Para realizar esta unión, se unen circuitos paso a paso analizando las impedancias intermedias, los parámetros S de transmisión y optimizando la red resultante durante el proceso. Se tienen en cuenta el diseño de las vías y su optimización cuando se integran en la estructura.

Al finalizar la estructura completa y tenerla optimizada, se procede a extraer los resultados finales de adaptación, relación axial, VSWR, diagrama de radiación del campo E, directividad, eficiencia y precisión del centro de fases de la antenna final. Estos resultados se analizan si comparándolos con los requisitos iniciales del sistema.

3.3 Propuesta de diseño de antenna

En esta sección se presenta el diseño de la antenna del proyecto. La antenna cuenta con varias capas las cuales tienen sus funciones específicas en la operativa del elemento unitario. Los elementos de estas capas han sido estudiados y diseñados en los Trabajos Fin de Grado previos de Adrián [2], María [3] y Juan Pedro [1]. En la Figura 3-1 que se presenta a continuación se puede observar la estructura completa de la antenna.

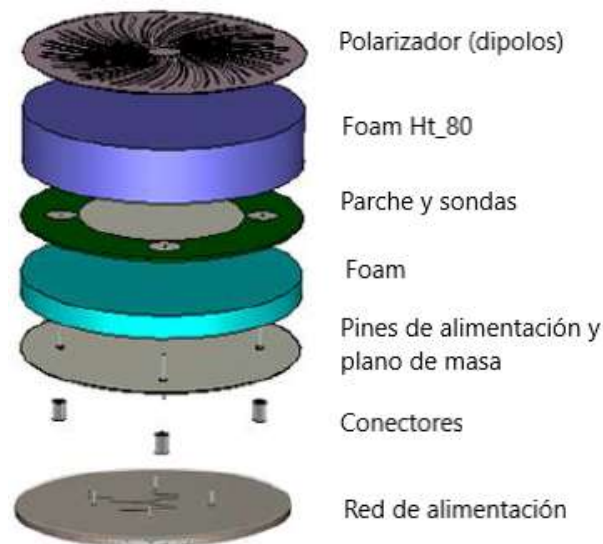


Figura 3-1: Elementos de la antenna [1]

- **Polarizador (dipolos):** optimiza el ancho de banda del elemento radiante, la adaptación y el rango de la relación axial.
- **Foam:** es el material dieléctrico que utiliza la antenna. Con el grosor adecuado de este material se mejora ancho de banda del elemento radiante.
- **Parche y sondas:** el parche se alimenta por medio de las sondas y genera el campo electromagnético que radia la antenna. Es un parche circular.
- **Plano de masa.**
- **Red de alimentación:** es el circuito por el que entra potencia a la antenna de forma equitativa para los cuatro puertos que conectan con las sondas del elemento radiante. Además, dota a la antenna de una polarización circular a derechas.

3.4 Propuestas de arquitectura de red de alimentación

En esta sección se van a analizar diferentes propuestas de topologías de red para poder alcanzar el objetivo de diseñar una red de banda ancha con rotación secuencial. El rango de frecuencias en el que se trabaja comprende entre 1.2 GHz a 1.6 GHz. La tecnología que se va a utilizar para la red de alimentación es la tecnología planar stripline, con el sustrato dieléctrico RF-35.

3.4.1 Híbrido Branch-Line con dos divisores de potencia

Partiendo del anterior Trabajo Fin de Grado de Juan Pedro [1], se propone añadir a cada divisor de potencia un stub junto al que ya está implementado. La red resultante debería quedar implementada tal y como se propuso: la señal entra a la red de alimentación por medio de uno de los puertos de entrada del Branch-Line y este desacopla la señal en dos equipotenciales con un desfase de 90° . Dichas señales entran a dos divisores de potencia en T (vertical y horizontal) los cuales dividen la señal en otras dos también equipotenciales y con un desfase de 180° entre ellas. Las salidas de estos divisores se conectan a las cuatro entradas del elemento radiante diseñado. Para comprender mejor el funcionamiento de la red y sus entradas y salidas, en la Figura 3-2 se muestra el esquema de la topología de red.

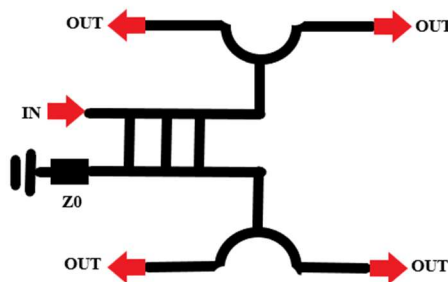


Figura 3-2: Esquema Branch-Line y divisores

En el anexo C se muestran con detalle los resultados significativos de las simulaciones de los divisores. Se han realizado múltiples combinaciones con las Secciones C y los stubs en T para conseguir un mayor ancho de banda. En dicho anexo se explica cómo se han diseñado los stubs y se realiza un análisis sobre qué tipos de divisores presentan una mejor respuesta que otros.

Analizando los resultados de diferentes combinaciones de stubs, con esta topología de red no se ha conseguido el ancho de banda necesario para abarcar toda la banda de frecuencias en la que operan los sistemas GNSS, por lo que es necesario rediseñar la arquitectura de red a una nueva estructura que ofrezca un mayor ancho de banda.

3.4.2 Matriz de Butler

Una vez descartado el diseño de los divisores de potencia con stubs para conseguir tener un desfase de 90° en cada puerto de salida de la red de alimentación, se busca una topología de red que cumpla los siguientes requisitos:

- La red de alimentación debe tener una entrada y cuatro salidas.
- La distribución de potencia debe ser equitativa en los cuatro puertos de salida.

- La diferencia de fase entre las salidas de la red de alimentación tiene que ser de 90° y este desfase tiene que ser progresivo entre cada puerta para dotar de una rotación secuencial a la red.

Por consiguiente, se plantea diseñar la red de alimentación como una Matriz de Butler. En el anexo D se hace referencia al layout del diseño y funcionamiento de este tipo de red de alimentación.

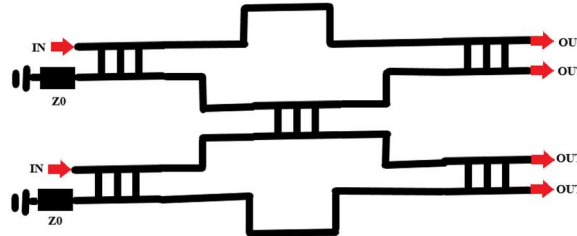


Figura 3-3: Esquema Matriz de Butler

Esta topología de red se ha descartado tras un primer análisis con el híbrido Branch-Line ya diseñado previamente. Hay que tener en cuenta que, para una perspectiva de construcción del proyecto, se requiere que este sea implementable con el menor uso de recursos posible. El diseño de un Branch-Line ocupa una capa de las medidas disponibles para la red, lo que implica que si se implementa una Matriz de Butler serían necesarias cinco niveles para la topología completa (cuatro capas para los híbridos Branch-Line de los extremos de la red y una capa para el híbrido crossover central).

3.4.3 Red de híbridos Branch-Line en cascada

Estos acopladores se diseñan con el fin de obtener la misma potencia de salida en cada puerto y un desfase progresivo de 90° . Por ejemplo, para el primer híbrido se va a necesitar que un cuarto de la potencia de entrada salga por un puerto de salida que irá conectado a la salida de la red y el resto de la potencia salga por el otro puerto de salida que irá conectado a la entrada del segundo Branch-Line. El esquema de la red propuesta es el mostrado en la Figura 3-5.

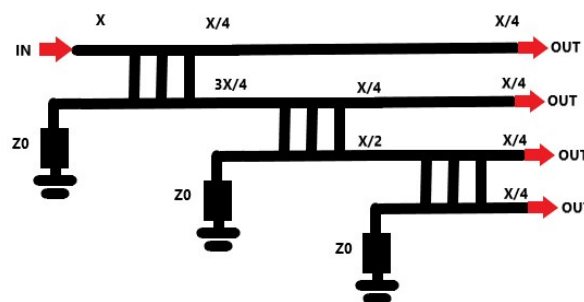


Figura 3-4: Esquema de red Branch-Line en cascada

Para conseguir que el desfase en la salida de la red se produzca de una manera secuencial, es necesario prolongar dichas salidas lo suficiente como para que cada puerto de salida esté

desfasado 90° respecto al anterior. Las prolongaciones de las dos primeras salidas se tienen que diseñar teniendo en cuenta el desfase entre ellas y entre las dos últimas.

Por ejemplo, las dos últimas salidas se encontrarán desfasadas 90° entre sí debido a la acción del acoplador híbrido. Para conseguir que la segunda salida únicamente esté desfasada 90° menos respecto a la tercera es necesario prolongar la salida de ese puerto hasta observar en la simulación el desfasaje de 90° . Por último, para conseguir el desfasaje de 90° entre las dos primeras salidas, se prolonga la primera salida hasta conseguir que la diferencia de fase sea 90° . De esta forma se obtendría una rotación secuencial de las salidas de la red de alimentación.

Esta arquitectura de red también se descarta para implementarla el proyecto, ya que, aunque la adaptación y la distribución de potencias se pueden considerar aceptables, la diferencia de fase no presenta una buena estabilidad para dotar a la antena de la rotación secuencial a derechas en todo el ancho de banda. Se necesita una estructura capaz de alcanzar un ancho de banda grande y presentar estabilidad.

En el anexo E se muestra cómo se ha diseñado paso a paso la arquitectura de red, indicando qué elementos Branch-Line se han utilizado y los resultados más significativos.

3.4.4 Red de híbrido Branch-Line (90°) y dos híbridos Rat-Race (180°)

La arquitectura de red definitiva que se ha implementado es una unión entre un híbrido acoplador de 90° (Branch-Line) y dos híbridos acopladores de 180° (Rat-Race). De esta forma, como se observará en el capítulo siguiente, se conseguirá una adaptación correcta, la distribución de potencias equitativa en las cuatro salidas y el desfase progresivo de 90° para dotar a la red de una rotación secuencial.

No se plantea utilizar dos acopladores Branch-line en lugar de dos Rat-Race porque estos últimos presentan un mayor ancho de banda, necesario para la arquitectura final. El ancho de banda estimado para un Branch-Line está limitado entre el 10% y el 20%, mientras que el ancho de banda estimado para un Rat-Race se encuentra en el orden del 20% y 30%.

En el cuarto capítulo se profundiza en los resultados de simulación y en la arquitectura final de esta red, mientras que en el anexo F se muestra paso a paso cómo ha sido el proceso de diseño y la evolución de dicha red, partiendo de los esquemáticos de ADS a los circuitos en CST.

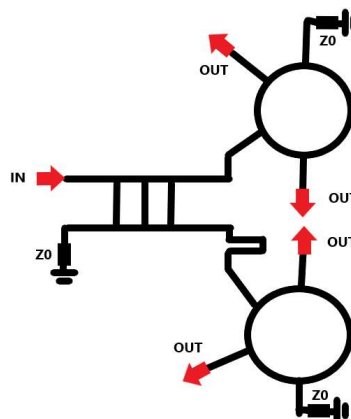


Figura 3-5: Esquema de arquitectura de red implementada

4 Desarrollo

En este capítulo se explican los aspectos más relevantes en el diseño de la red de alimentación final que se ha decidido implementar. Hay que recordar que en el capítulo anterior se recogen las diferentes arquitecturas de red que se han estudiado, incluida la arquitectura válida para los requerimientos del sistema. Esta red final se compone de un acoplador híbrido Branch-Line y de dos acopladores híbridos Rat-Race. Es la topología de red que se muestra en el subapartado 3.3.4 del tercer capítulo de la memoria. El diseño paso a paso de la red de alimentación en ADS y en CST se encuentra en el anexo F.

El flujo de trabajo para diseñar la red de alimentación se compone de: un estudio teórico de la viabilidad del diseño para los requerimientos del sistema, diseño de los tres circuitos por separado en ADS, verificación de la unión de los circuitos en ADS, diseño de los circuitos en CST y verificación de la unión de los circuitos en CST. Una vez se ha comprobado que los resultados son buenos, se procede a integrar la red de alimentación con el elemento radiante diseñado en TFGs previos. Estos resultados se muestran en el quinto capítulo de la memoria.

4.1 Aspectos teóricos

Tras la propuesta de arquitectura de red del tercer capítulo, a continuación, se muestran los detalles teóricos en los que se ha sustentado la decisión de diseño, analizando tanto el acoplador híbrido Branch-Line como el acoplador híbrido Rat-Race. Hay que tener en cuenta que se necesita una distribución equitativa de la potencia que se entrega a la antena por las cuatro vías. Por otro lado, se requiere que las salidas se encuentren desfasadas 90° unas respecto a otras, de forma secuencial, para dotar a la antena de una polarización circular.

4.1.1 Acoplador híbrido Branch-Line

El primer circuito que se ha analizado para implementarlo en la red es el híbrido Branch-Line. En la Figura 4-1 se muestra el esquemático del acoplador y su matriz de parámetros S. Se ha escogido este circuito, ya que se puede diseñar de tal forma que entregue la mitad de potencia de entrada a sus dos puertos de salida y, aunque el ancho de banda se encuentre limitado entre el 10% y el 20%, se puede ampliar implementando más anillos al circuito.

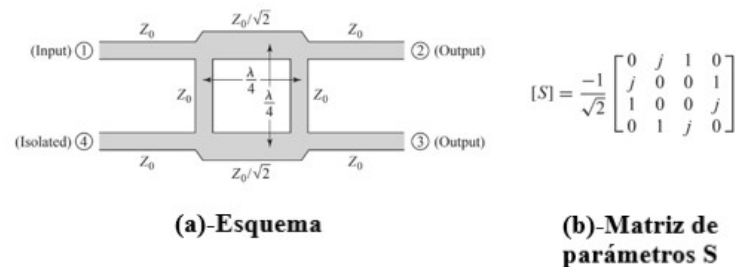


Figura 4-1: Branch-Line [15]

La vía de entrada a la red de alimentación será uno de los puertos de entrada al Branch-Line. El puerto contiguo es el puerto aislado que irá cargado con una impedancia de 48Ω . Las dos salidas del Branch-Line deben tener la misma potencia, ya que a dichas salidas del híbrido se conectarán las entradas de los híbridos Rat-Race. Como se requiere tener una distribución

de potencias equitativa y un ancho de banda lo más amplio posible, se ha diseñado un híbrido de dos anillos con las siguientes ecuaciones (1) y (2) [17].

$$Z_{0V1} = Z_{ref} \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + K^2}}{K} \quad (1)$$

$$Z_{0V2} = Z_{0H}^2 \cdot \frac{Z_{ref}^2 + Z_{0V1}^2}{2Z_{0V1}Z_{ref}} \quad (2)$$

Las impedancias corresponden con las impedancias horizontales y verticales del híbrido y el factor K (3) se corresponde con la distribución de potencia de los puertos de salida. El factor de distribución de potencia debe ser unitario para conseguir la misma potencia en los dos puertos de salida [17].

$$K = \sqrt{\frac{P_3}{P_2}} \quad (3)$$

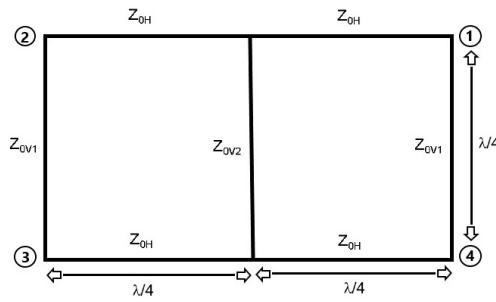


Figura 4-2: Impedancias y longitudes del Branch-Line

Cabe destacar que el acoplador híbrido Branch-Line originalmente dispone de un único anillo, como se observa en la Figura 4-1, pero en este caso se ha diseñado un híbrido de dos anillos para mejorar el ancho de banda debido a la necesidad de disponer de un amplio ancho de banda del sistema. Si fuera necesario ampliar más el ancho de banda, se podría estudiar implementar un tercer anillo.

Tabla 4-1: Impedancias resultado Branch-Line

Z_{0H}	Z_{0V1}	Z_{0V2}
35.35534 Ω	120.71068 Ω	35.35534 Ω

4.1.2 Acoplador híbrido Rat-Race

En la Figura 4-3 se muestra el esquemático del acoplador híbrido Rat-Race y su matriz de parámetros S. Este híbrido se ha escogido principalmente por la necesidad de ampliar el ancho de banda del sistema, ya que únicamente con el acoplador Branch-Line no era suficiente para abarcarlo. Gracias a esta estructura que presenta un ancho de banda entre el 20% y el 30%, se puede alcanzar una estabilidad en la diferencia de fase dentro del rango de 1.2 GHz a 1.6 GHz para cada puerto de salida. Además, el circuito dispone de cuatro puertos:

una entrada, dos salidas y un puerto aislado. Esta estructura permite entregar la misma potencia a las dos salidas, es decir, la mitad de la potencia de entrada al circuito.

La red de alimentación dispondrá de dos acopladores híbridos de 180° que irán conectados a las salidas del Branch-Line. Las salidas de los Rat-Race se conectarán a las entradas del elemento radiante mediante unos conectores y los dos puertos aislados se les conectará una carga de impedancia de 48 Ω .

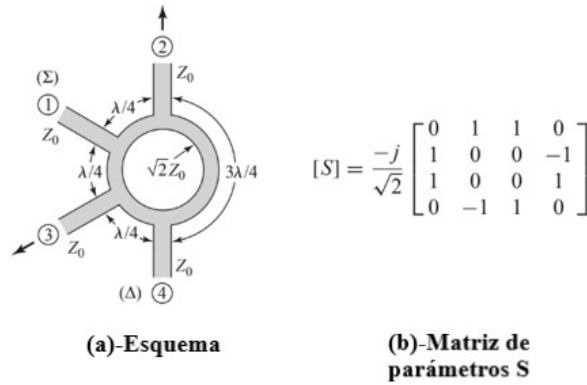


Figura 4-3: Rat-Race [15]

Al igual que se hizo para el diseño del Branch-Line, para diseñar el circuito Rat-Race se ha tenido en cuenta la siguiente expresión (4) para definir la impedancia característica [15]. A partir del resultado de impedancia, se definirá la anchura del anillo y de sus cuatro puertos.

$$Z_{ref} = \sqrt{2} * Z_0 \quad (4)$$

Posteriormente, se utilizarán transformadores lambda cuartos para ajustar la impedancia del circuito a las impedancias de las vías y se alargarán los puertos de salida lo suficiente para conseguir un desfase de 90° entre ellos, con referencia a la entrada del Rat-Race. Para conseguir el desfase de 90° entre los dos puertos de salida, será necesario que la longitud de uno de los puertos sea lambda cuartos más larga que la otra.

4.2 Diseño y verificación de los circuitos en ADS

En este apartado se mostrarán los resultados significativos de los diseños realizados en ADS para verificar que la arquitectura de red que se está diseñando cumple con los requisitos del sistema. Se propondrá una arquitectura ideal en la cual no se contempla el diseño multicapa que será necesario para introducir la red en las dimensiones de la antena.

Para ello, primero se han diseñado por separado un acoplador Branch-Line y dos acopladores Rat-Race (estos dos últimos son idénticos). Una vez diseñados y optimizados para alcanzar la misma potencia para cada puerto de salida y un desfase de 90° en todo el ancho de banda (1.2 GHz a 1.6 GHz), se procede a unirlos y analizar los resultados.

4.2.1 Acoplador híbrido Branch-Line

El primer circuito que se ha diseñado es el Branch-Line, debido a su diseño previo en el TFG de Juan Pedro [1]. Aunque en el TFG anterior ya se había diseñado, ha sido necesario rehacerlo para controlar las características de distribución de potencia, adaptación y desfase. Partiendo de las ecuaciones que se han mostrado en la sección 4.1.1, se han obtenido los

*Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación
secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS*

valores de anchura y longitud por medio de la herramienta LineCalc de ADS y el layout resultante es el que se muestra en la Figura 4-4.

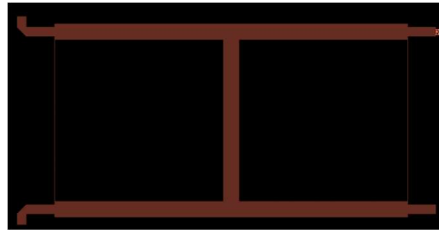


Figura 4-4: Layout Branch-Line ADS

Una vez diseñado el esquemático con los valores más óptimos de anchuras y longitudes, se realiza la simulación del circuito y se puede observar que el resultado del parámetro S_{11} es bueno, estando por debajo de -15 dB en toda la banda de frecuencias. Este resultado se observa en la Figura 4-5.

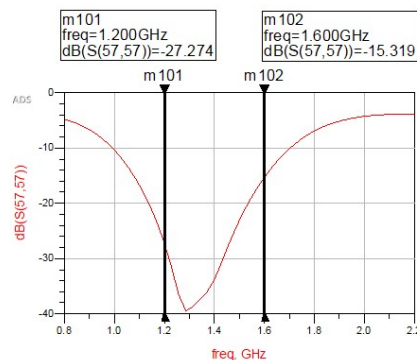


Figura 4-5: S11 Branch-Line ADS

Analizando la distribución de potencia, se puede comprobar que los parámetros S_{21} y S_{31} son casi idénticos a -3 dB (mitad de la potencia del circuito) entre las frecuencias 1.2 GHz a 1.6 GHz. También se observa un aislamiento muy bueno, estando el parámetro S_{41} por debajo de -15 dB en toda la banda. Estos resultados se detallan en la Figura 4-6.

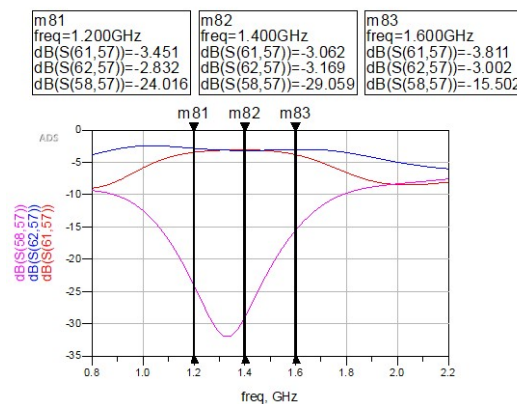


Figura 4-6: Potencia Branch-Line ADS

Por último, se comprueba el desfase entre los puertos de salida 2 y 3, teniendo como referencia el puerto 1 de entrada. Como se muestra en la siguiente figura, se obtiene un desfase de 90° en todo el ancho de banda que se analiza. El desfase del puerto 4 aislado no es relevante. Los resultados se muestran en la Figura 4-7.

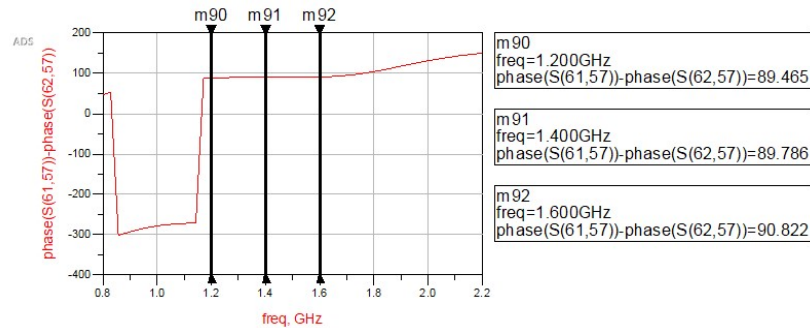


Figura 4-7: Fase Branch-Line ADS

4.2.2 Acoplador híbrido Rat-Race

Una vez visto el diseño y simulación del elemento Branch-Line, a continuación, se muestran los resultados significativos de los dos acopladores híbridos Rat-Race diseñados en ADS. Es necesario recordar que la arquitectura de red propuesta contiene a dos híbridos Rat-Race unidos al Branch-Line, pero como se requiere un desfase secuencial de los puertos de salida de la red, se necesita que uno de los anillos esté desfasado 90° respecto al otro. Para conseguir este desfase se implementa un stub de longitud $\lambda/4$ a la entrada de uno de los híbridos Rat-Race (el que tendrá las salidas desfasadas 180° y 270° respecto a la primera salida).

Como se muestra en el apartado 4.1.2, la impedancia característica viene dada por la expresión (4). Tras obtener el resultado de la impedancia de característica (70.71068Ω), se introduce dicha impedancia en el LineCalc de ADS y se definen los valores de anchura y longitud del anillo y sus puertos. Los layout resultantes de los circuitos son los que se muestran en la Figura 4-8.

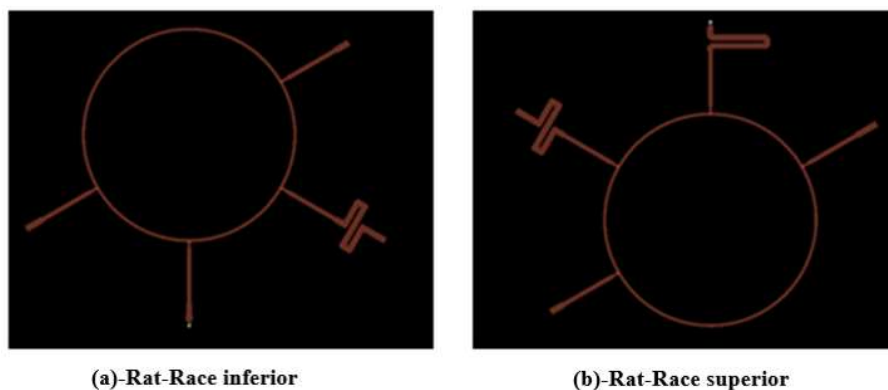


Figura 4-8: Layout Rat-Races ADS

Una vez simulados ambos esquemáticos, el resultado del parámetro S_{11} se analiza en la Figura 4-9 que se muestra a continuación. Tanto para el anillo sin desfasar (Figura 4-9(a)), como para el anillo con el stub a la entrada (Figura 4-9(b)) se observa una adaptación correcta

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

por debajo de -10 dB en todo el rango de frecuencias. Además, se observa una ligera mejora de la adaptación en el circuito con el stub a la entrada.

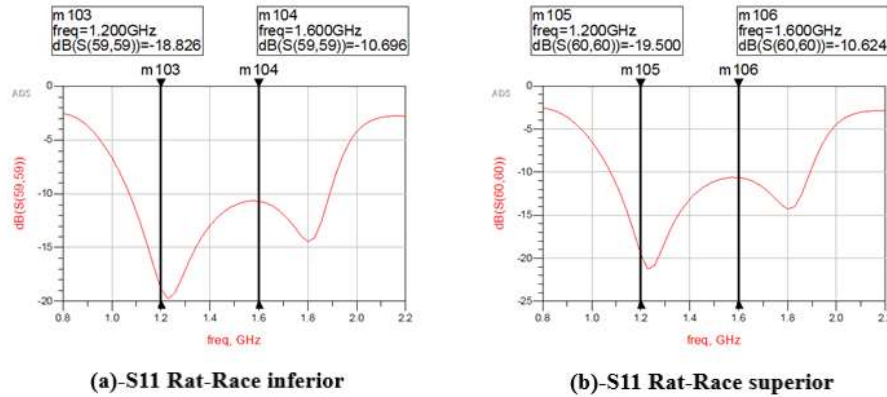


Figura 4-9: S11 Rat-Races ADS

A continuación, en la Figura 4-10, se muestran los resultados de los parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} , siendo los dos primeros los coeficientes de transmisión de la potencia entregada a los puertos de entrada al elemento radiante. El parámetro S_{41} se relaciona con la potencia entregada al puerto aislado de cada circuito. La potencia que se entrega a cada puerto de entrada de la antena es la mitad de la que entra al acoplador híbrido (está aproximadamente a -3 dB en toda la banda de frecuencias). La potencia entregada a los puertos aislados es muy inferior, por debajo de -18 dB, por lo que se consideran unos resultados correctos en cuanto a la transmisión de potencia del circuito.

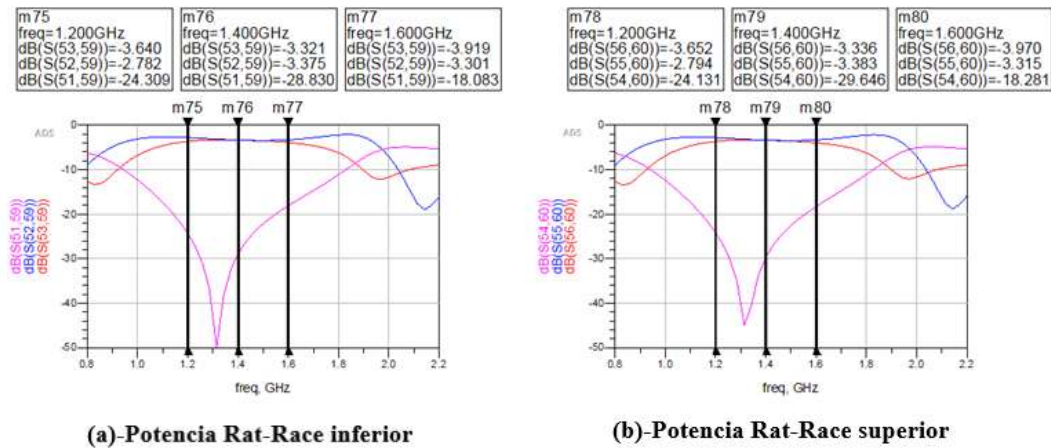


Figura 4-10: Potencia Rat-Races ADS

Por último, se adjuntan los resultados de diferencia de fase entre los dos puertos de salida de cada anillo hacia el elemento radiante. Cabe destacar que este resultado es el que se busca mejorar principalmente para alcanzar los requisitos del sistema de ser operativo en un amplio ancho de banda.

Hay que tener en cuenta que, al requerir un desfase progresivo en las salidas de la red de alimentación, cada puerto tiene que estar desfasado 90° respecto a otra salida, haciendo este desfase progresivo secuencial en dirección circular a derechas. Para conseguirlo, se necesita

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

alcanzar 90° en el desfase de cada híbrido Rat-Race por separado, por lo que se implementa en este modelo ideal una doble sección C con longitud $\lambda/4$.

Como se observa en la Figura 4-11, se alcanza el objetivo de 90° de desfase entre los dos puertos de salida para todo el ancho de banda. Además, se observa que este tipo de acoplador proporciona un mayor ancho de banda que el Branch-Line de doble sección. También se puede comprobar que el ancho de banda del circuito Rat-Race con un stub a la entrada es ligeramente más amplio que el Rat-Race normal. Esto se debe al efecto del acoplo electromagnético del stub.

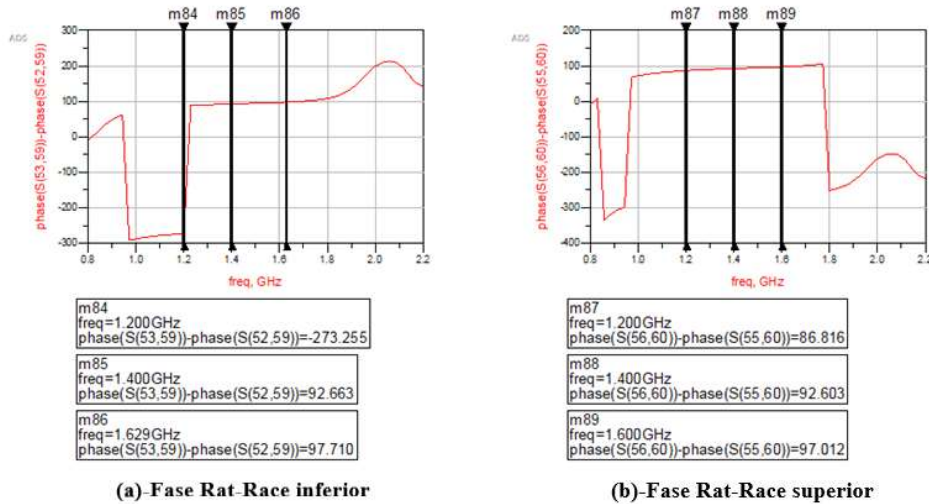


Figura 4-11: Fase Rat-Races ADS

4.2.3 Unión red de alimentación

Una vez mostrados los tres circuitos de la red por separado y tras comprobar que con estas estructuras se podrían alcanzar los requisitos de adaptación, potencia y fase del sistema, se procede a unirlos para comprobar el comportamiento de la red completa. Cabe recordar que para el diseño en ADS no se han tenido en cuenta las dimensiones de la red unida más allá de lo que ocupa cada elemento por separado. En este programa se propone simular la red de una forma ideal sin vías intermedias para verificar su correcto funcionamiento y así proceder a implementar el diseño multicapa en CST, ajustando la red de alimentación a las medidas del elemento radiante. Tras la unión de los tres elementos y su optimización, el layout de la red de alimentación resultante es la que se observa en la Figura 4-12.

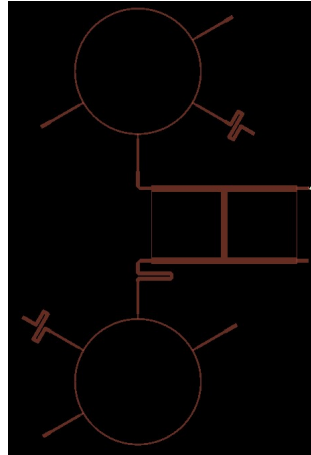


Figura 4-12: Layout red unida ADS

Al simular la red completa, la adaptación que se observa con el parámetro S_{11} es buena ya que el coeficiente de adaptación está por debajo de -10 dB y se considera un buen resultado si la red está por debajo de dicho valor. Este resultado de adaptación se considera correcto en el diseño en ADS, pero al extrapolar la arquitectura a CST y definir la topología en varios niveles, la adaptación no será la misma debido al análisis electromagnético y a la influencia de las vías, por lo que será necesario optimizar la arquitectura. La adaptación en ADS se muestra en la figura 4-13.

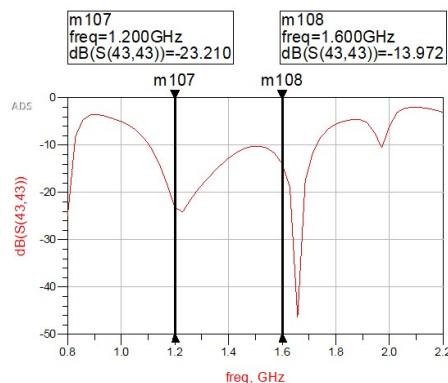


Figura 4-13: S11 Red unida ADS

En referencia a los parámetros de transmisión de los puertos de entrada al elemento radiante (S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{51}), en la Figura 4-14 se observa que la potencia transmitida para los cuatro puertos de salida es en torno a -6 dB, un cuarto de la potencia para cada puerto. En prácticamente toda la banda de frecuencias es casi exacta esta igualdad de potencias, a excepción de las frecuencias inferiores y superiores de los extremos del ancho de banda. A estas frecuencias existe una diferencia máxima de 1.8 dB entre los coeficientes de transmisión de dos puertos de salida.

Respecto a los puertos aislados, los coeficientes S_{61} , S_{71} y S_{81} están por debajo de -17 dB en todo el ancho de banda, siendo este valor el más alto que se encuentra en el extremo superior de la banda. Este nivel de aislamiento se considera bastante bueno, debido a la mínima transmisión de potencia hacia los puertos aislados de la red.

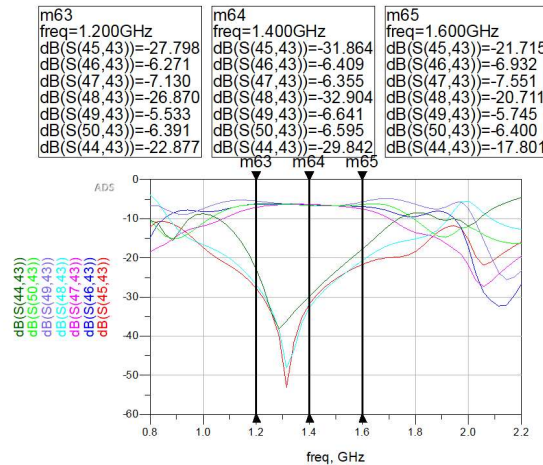


Figura 4-14: Potencia Red unida ADS

Por último, queda analizar el desfase secuencial de los cuatro puertos de salida de la red de alimentación que se conectan al elemento radiante. Para ello, se ha tomado la diferencia de fase de los puertos de salida 3, 4 y 5 con respecto al puerto de referencia de salida 2, el cual será el puerto con el recorrido más corto desde la entrada de la red de alimentación.

Como se observa en la Figura 4-15, el puerto 2 se toma como referencia para calcular la diferencia de fase. Por esta razón, en el puerto 2 se encuentra un desfase de 0° . Al realizar la diferencia de fase del puerto 3 con el puerto 2 se obtiene un desfase de -90° . La diferencia de fase del puerto 4 con el puerto 2 ofrece un desfase de -180° y, por último, la diferencia de fase del puerto 5 con el puerto 2 da como resultado -270° .

Debido a los requisitos del sistema, el mayor error de fase que se puede permitir para esta red es de 10° , y en la Figura 4-15 se observa que el mayor error de fase se produce en el puerto de salida 5 con un valor de 16° . Este dato se buscará corregir al diseñarlo en CST, ya que la topología no será exactamente igual debido al diseño multicapa necesario para la antena.

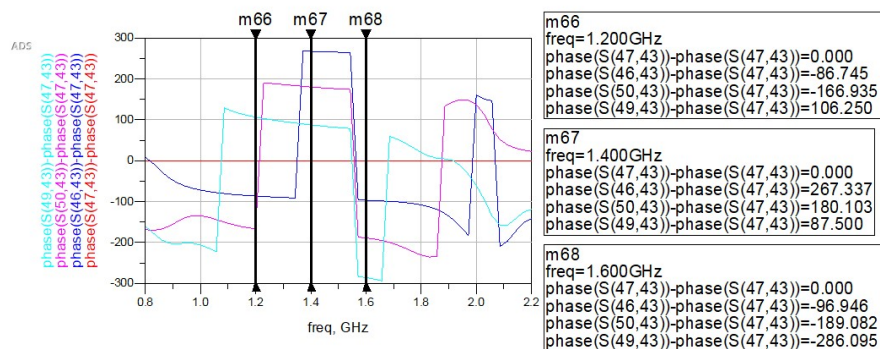


Figura 4-15: Fase Red unida ADS

4.3 Diseño y verificación de los circuitos en CST

Una vez se ha verificado que la arquitectura de red cumple los requisitos del sistema, se procede a implementar la red en las dimensiones de la antena final. Para ello, como los resultados que ofrece ADS no son exactamente los mismos a los que ofrece CST debido a

que en este último se tienen en cuenta los acoplos electromagnéticos existentes en la estructura, se requiere el diseño paso a paso de los tres circuitos con las dimensiones finales de los diseñados en ADS.

Partiendo de las dimensiones resultantes de los tres circuitos en ADS, se modifican y optimizan para alcanzar buenos resultados en las simulaciones en CST. Para los elementos por separado no se van a tener en cuenta las vías que unirán las diferentes capas. Dichas vías se tendrán en cuenta cuando se proceda a la unión completa de la red.

4.3.1 Acoplador híbrido Branch-Line

El primer elemento que se analiza es el Branch-Line. En este caso, el resultado de transmisión de potencia y adaptación no eran exactamente los esperados del ADS, por lo que ha sido necesario modificarlo para optimizarlo. Los resultados de la simulación del CST son los que más se aproximarán a los resultados reales tras una medición con el analizador de espectros.

El resultado de adaptación se puede observar en la Figura 4-16, donde se muestra que el parámetro S_{11} se encuentra por debajo de -18 dB. Aunque es un resultado algo peor que el ofrecido en ADS, sigue siendo un resultado bueno para dar por válida la adaptación del circuito.

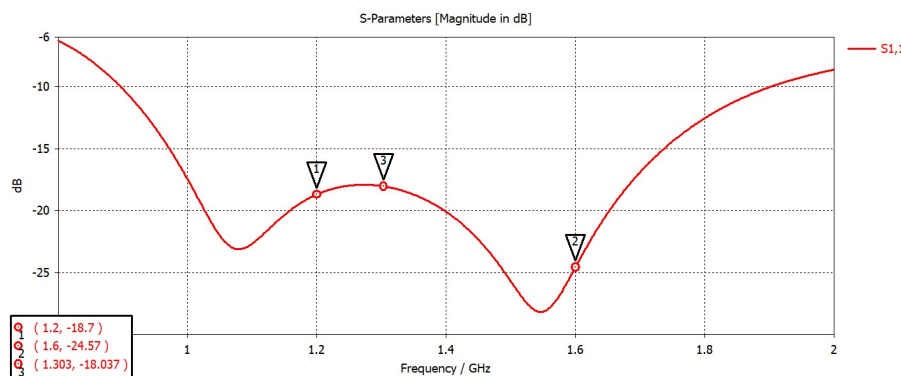


Figura 4-16: S_{11} Branch-Line CST

La distribución de potencia se muestra en la siguiente Figura 4-17 donde se comprueba que se consigue la misma potencia en todo el ancho de banda para los puertos de salida del Branch-Line y una potencia muy baja para el puerto aislado. La potencia entregada en los puertos de salida del Branch-Line se encuentran en torno a los -3 dB, es decir, la mitad de la potencia, mientras que la potencia que se entrega al puerto aislado se encuentra por debajo de -17 dB, un resultado muy por debajo de los -3 dB.

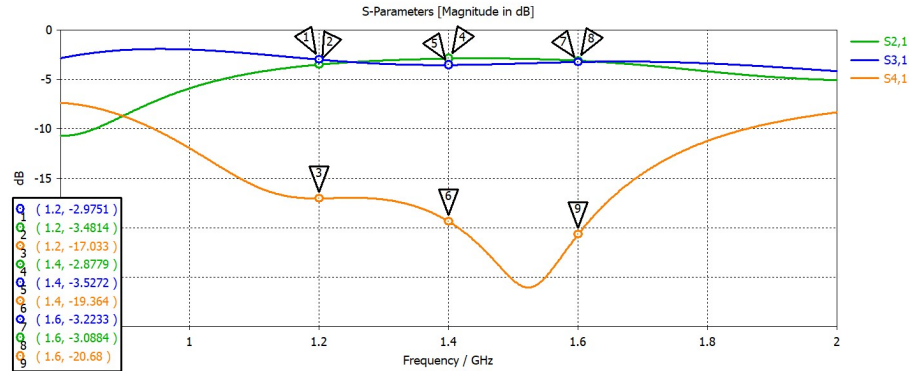


Figura 4-17: Potencia Branch-Line CST

Por último, en la Figura 4-18 se analiza la diferencia de fase entre los dos puertos de salida del Branch-Line y se observa que para todo el rango de frecuencias se alcanzan los 90° de desfase. Cabe destacar que esta diferencia de fase es más amplia que la mostrada en la simulación de ADS. La fase del puerto aislado no es relevante ya que irá conectado a una carga.

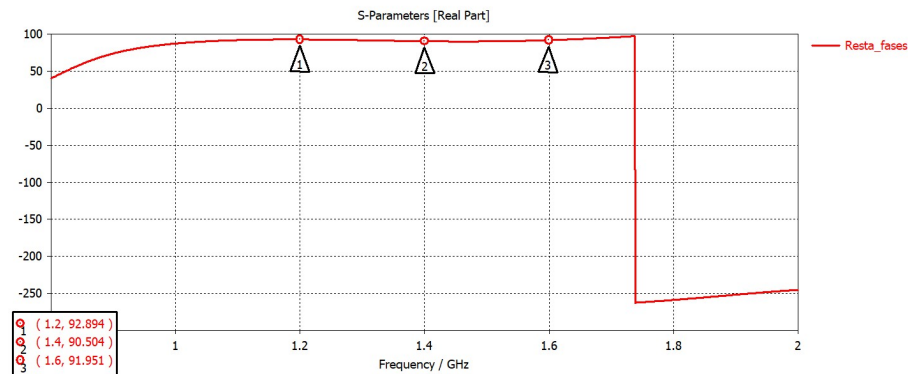


Figura 4-18: Fase Branch-Line CST

4.3.2 Acoplador híbrido Rat-Race inferior

El híbrido Rat-Race que no se desfasa se encontrará en el nivel inferior de la estructura. En este caso, el resultado del híbrido es muy similar al ofrecido en el ADS con las mismas dimensiones. Al igual que el híbrido Branch-Line, ha sido necesario diseñar el circuito y optimizarlo para que a través de la simulación ofrezcan unos resultados correctos.

El parámetro S_{11} se puede observar en la Figura 4-19 de a continuación. Se puede comparar con el resultado de ADS y se observa que es similar. La adaptación se encuentra por debajo de -9.5 dB en toda la banda de frecuencias, lo que se considera correcto.

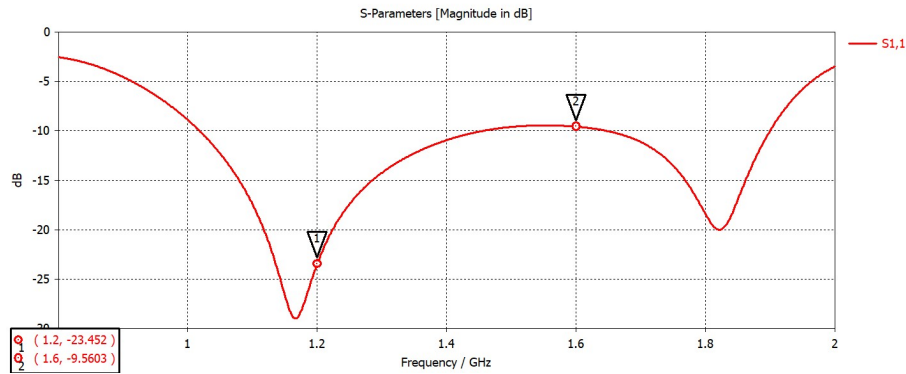


Figura 4-19: S11 Rat-Race inferior CST

Respecto a la distribución de potencia se observa en la Figura 4-20 una igualdad en la potencia entregada en torno a -3 dB en todo el rango de frecuencias y una potencia muy inferior por debajo de -16 dB en el puerto aislado. Este resultado es correcto, indicando que toda la potencia de entrada a este circuito se distribuye a los dos puertos de salida que irán conectados a la antenna.

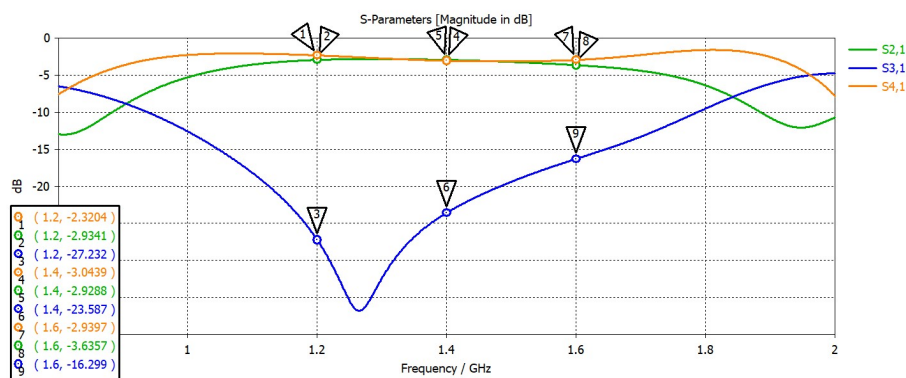


Figura 4-20: Potencia Rat-Race inferior CST

Por último, la diferencia de fase se observa en la Figura 4-21 donde para todo el ancho de banda se tienen 90° de desfase gracias a la prolongación lambda cuartos de uno de los puertos de salida. El error máximo que se tiene es de 10°, error permitido por los requisitos de diseño. Se considera un resultado correcto para dotar a dos de los puertos de entrada a la antenna del desfase progresivo para todo el ancho de banda analizado.

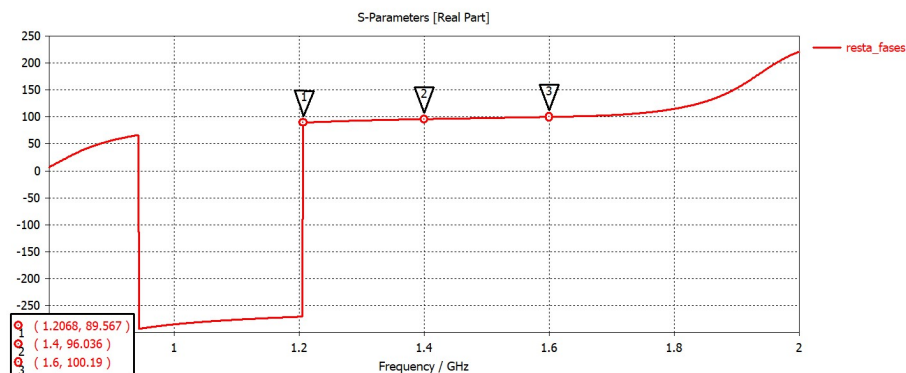


Figura 4-21: Fase Rat-Race inferior CST

4.3.3 Acoplador híbrido Rat-Race superior

El híbrido que será desfasado 90° respecto al otro Rat-Race debido a un stub de $\lambda/4$ a la entrada se encontrará en el nivel superior de la estructura. Al igual que para los otros dos circuitos, se ha diseñado y optimizado. En este caso se prueba a simular el circuito con la prolongación implementada mediante un stub, el cual mejorará la adaptación del elemento.

El resultado de la adaptación del circuito es algo peor respecto al ADS. Se puede observar en la Figura 4-22 de a continuación. Como se ha comentado previamente, debido al stub implementado se ha mejorado levemente la adaptación de la red en comparación con el otro Rat-Race.

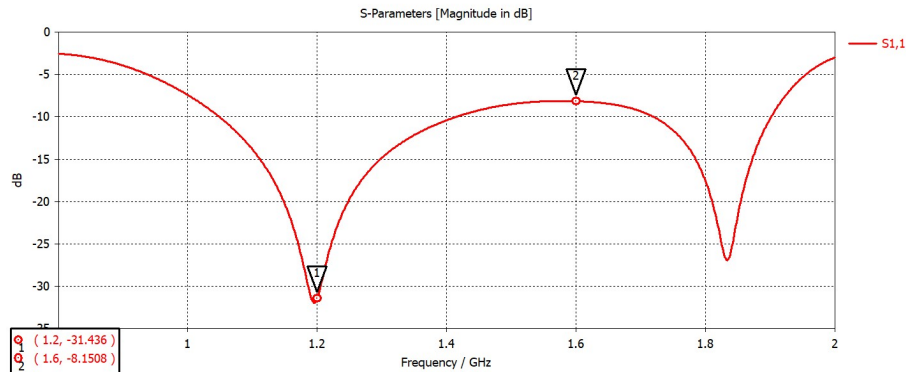


Figura 4-22: S11 Rat-Race superior CST

En relación a los parámetros de transmisión, se observa en la Figura 4-23 que la potencia entregada a los puertos de salida del circuito es prácticamente la misma, -3 dB, a lo largo de toda la banda de frecuencias, mientras que la potencia entregada a la puerta aislada está por debajo de -16 dB. Estos resultados se consideran correctos, puesto que toda la potencia de entrada al circuito se distribuye en los dos puertos que se conectan a la antena.

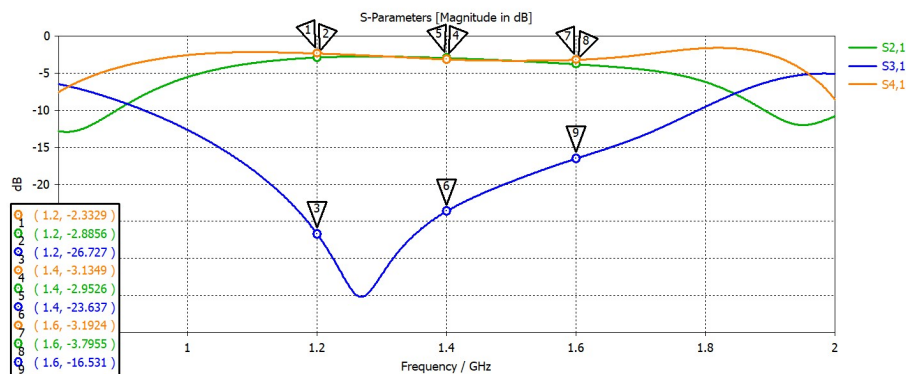


Figura 4-23: Potencia Rat-Race superior CST

Por último, en la Figura 4-24 se analiza la diferencia de fase entre los dos puertos de salida del híbrido, sin contar el puerto aislado. Gracias al alargamiento $\lambda/4$ de uno de los puertos de salida se consigue una gran estabilidad de fase en todo el ancho de banda, en torno a 90° permitiendo un error de 10° . El híbrido estará desfasado 90° respecto al otro.

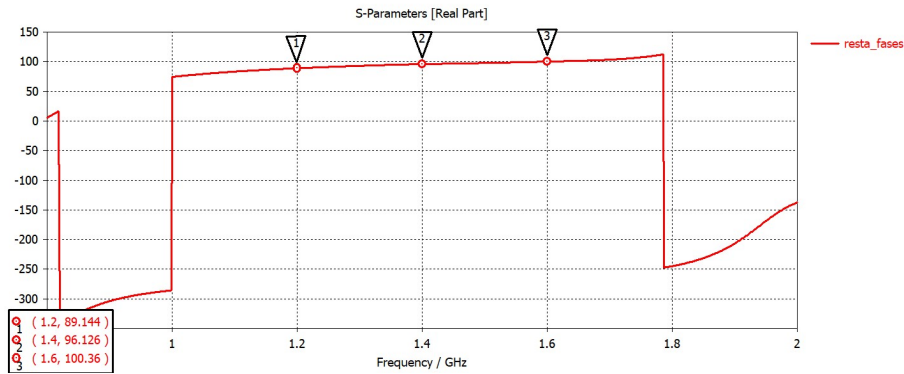


Figura 4-24: Fase Rat-Race superior CST

4.3.4 Unión red de alimentación

En esta última subsección se muestra la unión completa de los tres híbridos que se han diseñado en CST. Debido a la colocación de los puertos de entrada a la antena, se necesitan conectar las salidas de los dos híbridos Rat-Race que irán a las vías de la antena justo en esas posiciones.

Como las dimensiones de la red de alimentación completa son considerablemente grandes en comparación al elemento radiante, se ha decidido implementar la red en una estructura multicapa de tres niveles.

- En el nivel inferior se sitúa el Rat-Race sin desfase y se conectarán sus dos puertos de salida no aislados a las entradas de la antena. Estas salidas corresponderán con los puertos con fase 0° y 90° , según el puerto de salida de la red que se ha seleccionado como referencia.
- En el nivel intermedio se sitúa el Branch-Line, el cual tendrá la vía de entrada a la red de alimentación y se conectarán sus salidas con los híbridos de los niveles inferior y superior.
- En el nivel superior de la estructura se sitúa el Rat-Race con el stub lambda cuartos. Los puertos de salida no aislados se conectan con las entradas a la antena que tendrán 180° y 270° según el puerto de salida de la red tomado como referencia.

Para interconectar los elementos que se encuentran en diferentes niveles de la estructura se han utilizado vías diseñadas en el TFG de Juan Pedro [1]. Estas vías se han optimizado a las impedancias de referencia de los circuitos actuales. Además de utilizar las vías simples y dobles con puerto que diseñó Juan Pedro [1], se han diseñado las vías triples con puerto necesarias para atravesar tres niveles completos de tecnología stripline. En el anexo G se muestra el diseño de las vías.

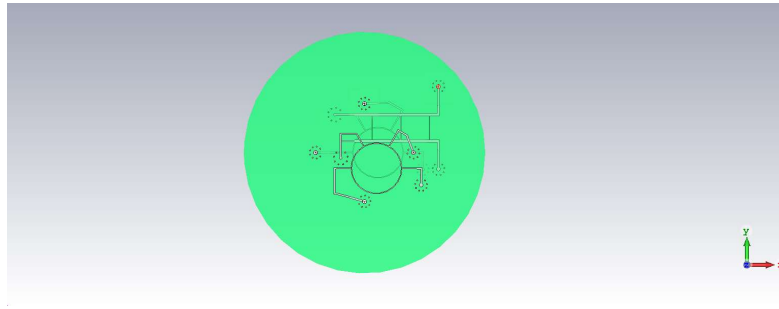


Figura 4-25: Layout Red unida CST

Tras la simulación de la red completa, la respuesta del coeficiente de adaptación S_{11} se observa en la Figura 4-26 de a continuación. El resultado que se observa es un valor por debajo de -12 dB en todo el rango de frecuencias, y se considera un buen resultado de adaptación si la red completa se encuentra por debajo de -10 dB.

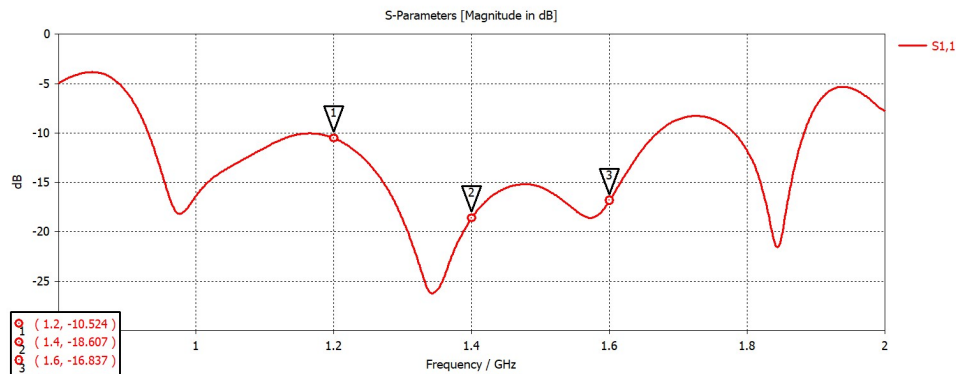


Figura 4-26: S11 Red unida CST

A continuación, se analiza la potencia entregada a cada puerto de salida. Este dato es muy importante tenerlo en cuenta debido a que una correcta igualdad de potencia entregada a cada puerto de entrada a la antena permite mejorar la relación axial del sistema.

Como se puede observar en la Figura 4-27 en casi toda la banda de frecuencias se tiene aproximadamente la misma potencia con una diferencia de 1 dB, a excepción de las frecuencias inferior y superior de la banda que presentan una diferencia de 2 dB, algo peor que en la simulación de ADS.

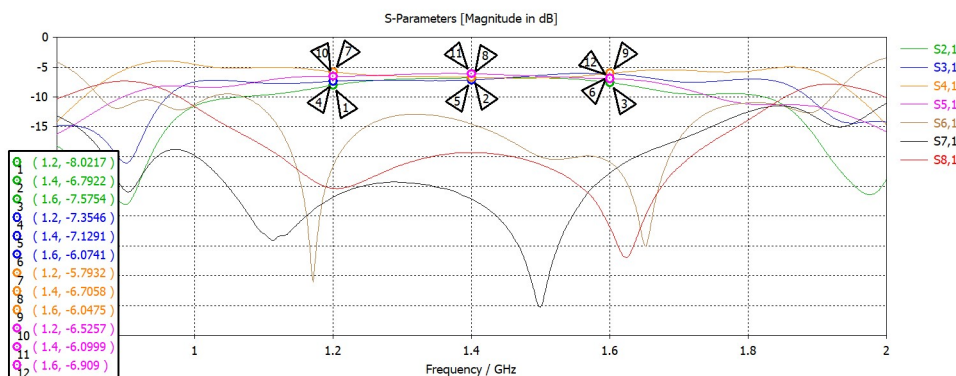


Figura 4-27: Potencia Red unida CST

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

Por último, queda por analizar la fase de cada puerto de entrada a la antenna. Hay que recordar que las antenas de los sistemas GNSS utilizan una polarización circular a derechas (RHCP) para poder transmitir y recibir la información. Por ello, se necesita que el desfase secuencial se produzca en dirección a derechas de la red de alimentación para polarizar una antenna GNSS receptora. Realizando el análisis de la diferencia de fase al igual que se hizo en la sección anterior de diseño en ADS (restar a la fase de cada puerto la fase del puerto de referencia 0°). Los resultados se exponen en la Figura 4-28.

Analizando los resultados se observa que para tres de los cuatro puertos la fase da un resultado muy bueno, permitiendo un ancho de banda mayor del que se puso como objetivo en el proyecto (1.2 GHz a 1.6 GHz). En el último puerto de la red que tiene como requisito presentar una fase de 270° respecto a la salida de referencia, y se observa que no se cumple el error máximo de 10° en todo el ancho de banda analizado. Aunque se disponen de -270° a la frecuencia central de la banda y en el rango de 1.3077 GHz a 1.5305 GHz, en los extremos del ancho de banda se tiene un error de 26°. Se necesita aplanar la curva de diferencia de fase porque la inclinación que se observa para dicho puerto resulta imposible de fijar la fase a -270° para todo el rango de frecuencias.

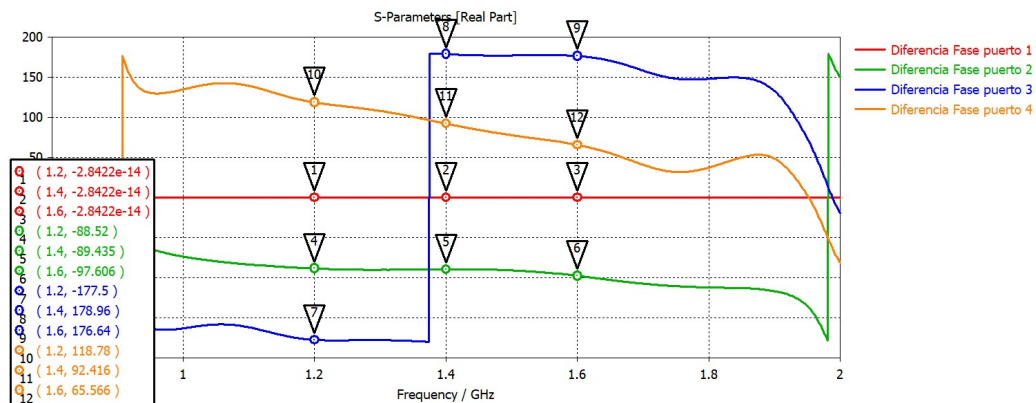


Figura 4-28: Fase Red unida CST

5 Integración, pruebas y resultados

Una vez realizado el trabajo de investigación, la implementación teórica en ADS y la implementación en CST de la arquitectura de la red de alimentación, se procede en este capítulo a comentar los resultados finales de la integración de la red con el elemento radiante. En la Figura 5-1 se puede observar la antenna con cavidad unida a la red de alimentación, formando la antenna GNSS final del proyecto. Esta antenna dispone de un puerto de entrada y tres puertos aislados con cargas de 48 ohmios.

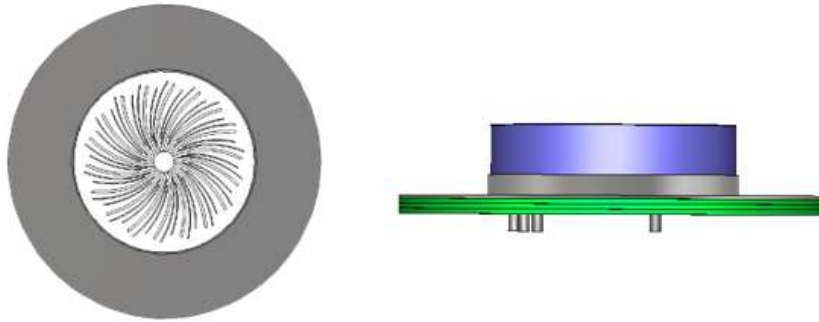


Figura 5-1: Antena GNSS

Tras la simulación de la antena GNSS completa, se puede observar en la Figura 5-2 que la respuesta del parámetro S_{11} se encuentra por debajo de los -10 dB en aproximadamente todo el ancho de banda analizado a excepción del extremo inferior. Además, en la Carta de Smith se observa que los círculos están aproximadamente centrados en el origen y en el caso del valor en la frecuencia central, esta apenas tiene componente imaginaria.

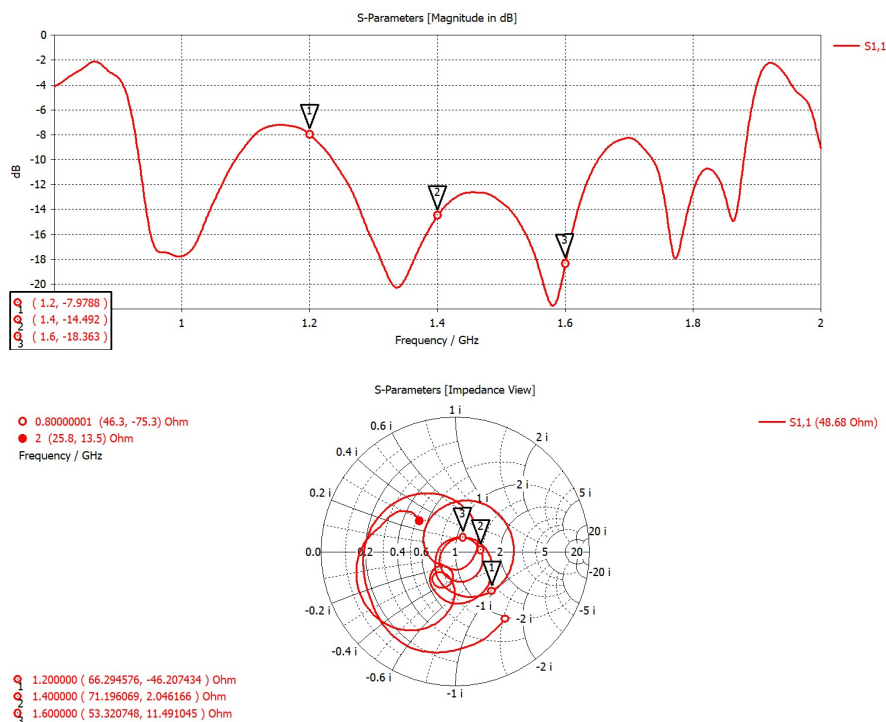


Figura 5-2: Parámetro S_{11} y Carta Smith

En la Figura 5-3 se puede observar el resultado de relación axial una vez simulado la antena completa. Analizando las gráficas, se puede percibir una relación axial muy buena para la frecuencia central de la banda (1.4 GHz) ya que la curva se aproxima a cero, mientras que las dos frecuencias de los extremos presentan una mala relación axial. Esto se debe como consecuencia de la distribución de potencia que se contempla en la Figura 4-27, en donde se aprecia que la equidad de potencia a la frecuencia central es buena mientras que en los extremos hay una diferencia entre puertos de un máximo de 2 dB. A una mayor igualdad de potencia en la distribución, se consigue una mejor relación axial que permite alcanzar una polarización circular mejor.

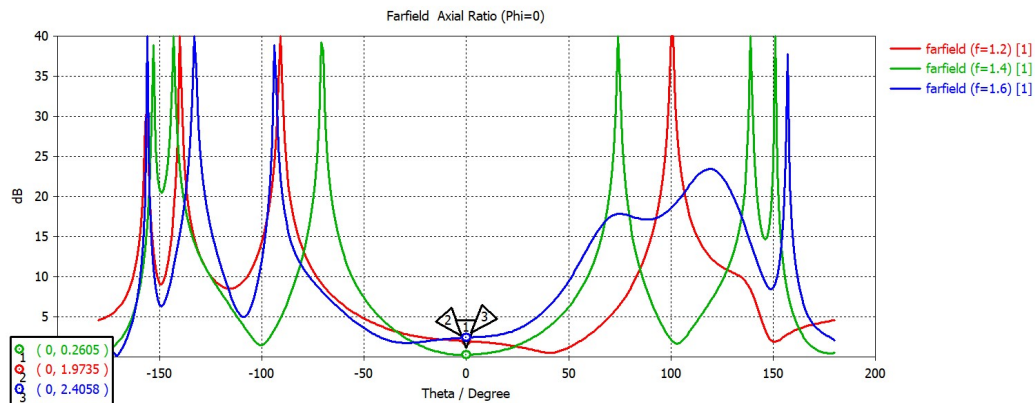


Figura 5-3: Relación Axial

A continuación, se muestra el resultado de la Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (VSWR) en la cual se indica cuánta potencia se entrega de la red de alimentación a la antena. Cuanto menor sea el valor de VSWR más potencia se entrega y, por tanto, el comportamiento será más ideal llegando a un valor de 1 en el mejor caso.

En los requisitos del sistema, se indica que el valor de VSWR debe encontrarse en el rango 2:1, el cual se considera un buen valor para las antenas GNSS. En la Figura 5-4 se puede observar que cumple en toda la banda de frecuencias a excepción de 1.2 GHz en el que se sobrepasa por poco ese límite.

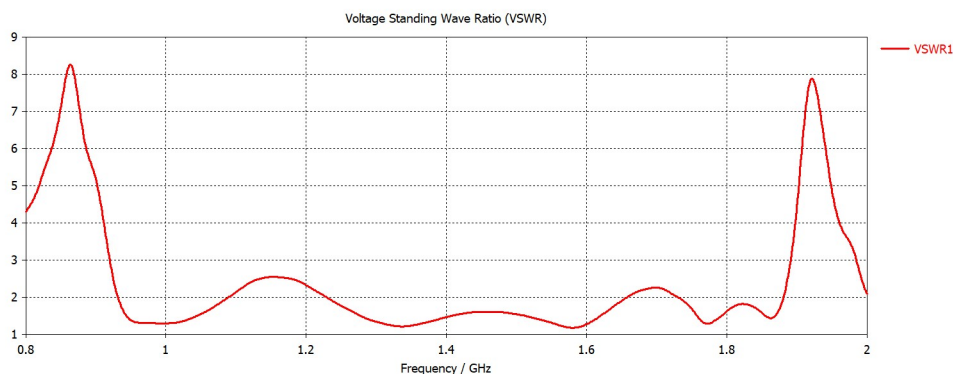


Figura 5-4: VSWR

Por último, se procede a analizar los resultados de las componentes copolar y contrapolar de los diagramas de radiación tanto para el Campo E como para el Campo H. En primer lugar,

en la Figura 5-5 se muestra el diagrama de radiación 3D con las coordenadas esféricas para cada una de las frecuencias de los extremos y central con el fin de comprender cómo varía el diagrama de radiación 3D de la antena en el ancho de banda, tomando como referencia dichas frecuencias. Esto servirá para concretar qué valores de phi y theta muestran los campos E y H.

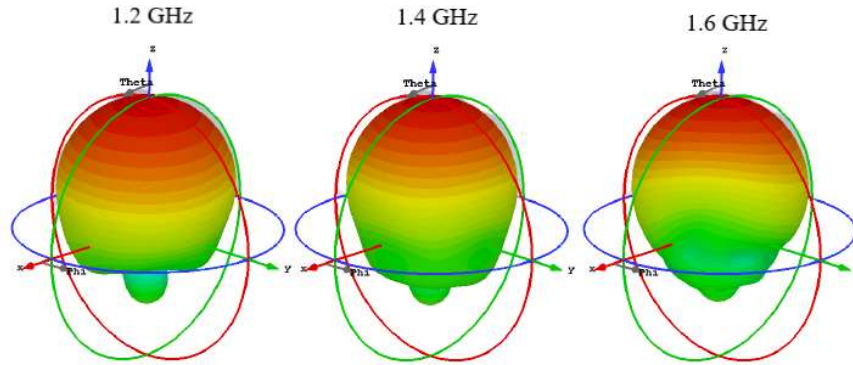


Figura 5-5: Diagrama de radiación 3D

Una vez comprobado qué valores de theta y phi son necesarios para analizar los campos E, se procede a analizar estos campos primero para las tres frecuencias de referencia (las de los extremos y la central) y segundo para cada frecuencia portadora de cada una de las bandas GNSS. Esta disgregación se realiza para verificar de una forma más nítida el comportamiento de las componentes copolar y contrapolar en el ancho de banda estudiado.

El campo que se observa es el Campo E correspondiente con $\phi=90^\circ$ en la Figura 5-6. A la izquierda se puede analizar las componentes copolar y contrapolar de las tres frecuencias de referencia en las que se ha basado el TFG. A la derecha se puede observar más en detalle las componentes copolar y contrapolar del campo E en cada una de las frecuencias portadoras de las bandas GNSS. Se verifica que la componente copolar es correcta pero la contrapolar tiene un alto nivel de directividad en comparación con la copolar.

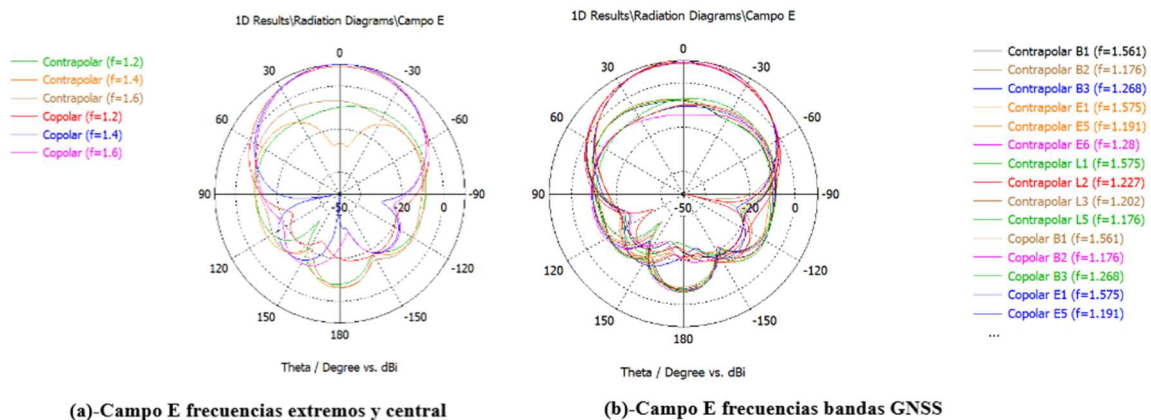


Figura 5-6: Radiación Campo E

*Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación
secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS*

A continuación, queda analizar cómo se comporta el centro de fase en función de la frecuencia, la directividad y la eficiencia de la antena. Para obtener el resultado del centro de fase se requiere analizar qué valor de sigma (máxima desviación estándar de fase) ofrece el simulador a las frecuencias portadoras de las bandas GNSS. En cuanto la directividad y la eficiencia se extraerá directamente los valores de CST para cada una de las frecuencias portadoras.

Tal y como se observa en la Tabla 5-1, se percibe que el centro de fase varía de una manera suave en las frecuencias portadoras cercanas al extremo inferior del ancho de banda (1.2 GHz) y a medida que se aumenta en frecuencia la desviación máxima estándar aumenta. Este aumento de sigma conlleva una menor precisión del centro de fase en las portadoras de GNSS cercanas a 1.6 GHz. Con este resultado se puede verificar que la variación del centro de fase no es grande en la mayor parte del ancho de banda y así proporcionar precisión a la antena GNSS. Cabe destacar que, cuanto más directiva es la radiación de la antena, menos estable es el centro de fase y mayor es el valor de sigma que indica que la variación del centro de fase aumenta.

Además, el parámetro de directividad que se analiza se concluye que es una ganancia correcta para el funcionamiento de la antena, entre 8.81 dBi y 10.3 dBi para todo el rango de frecuencias analizado. Hay que tener en cuenta que la antena es una antena de parche circular y este tipo de antenas no poseen una ganancia directiva muy alta. Respecto a la eficiencia, también se puede observar que se consiguen unos resultados buenos teniendo en cuenta que para todo el rango de frecuencias portadoras, a excepción de la portadora inferior, se tiene un porcentaje de eficiencia superior al 70% hasta un máximo de 84.77 %.

Tabla 5-1: Resultados para cada banda GNSS

	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L5</i>	<i>E1</i>	<i>E5</i>	<i>E6</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
Frecuencia (GHz)	1.575	1.227	1.202	1.176	1.575	1.191	1.28	1.561	1.176	1.268
Desv. Máx. Centro de fase en Z +/- 30°	2.461	0.996	1.085	0.951	2.461	1.085	1.506	3.269	0.951	0.966
Directividad (dBi)	10.2	9.2	9.11	8.81	10.2	9.12	9.25	10.3	8.81	9.26
Eficiencia (%)	84.36	73.16	70.21	66.49	84.36	70.34	78.5	84.77	66.49	77.16

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

Uno de los principales objetivos de los diseñadores de antenas para sistemas GNSS es desarrollar antenas capaces de operar en todo el rango de frecuencias de todos los sistemas actuales (GPS y GLONASS) y los futuros (Galileo y COMPASS). Estas antenas tienen que disponer de un correcto centro de fases para mejorar la precisión, buenos niveles de componentes copolar y contrapolar, etc. Para ello, es imprescindible diseñar redes de alimentación de banda ancha que engloben todas las portadoras de las bandas de frecuencia en las que trabajan dichos sistemas.

Debido al trabajo de investigación realizado en la búsqueda de una arquitectura correcta para los requisitos del sistema, se ha tenido la oportunidad de estudiar diferentes modelos de circuitos y sus correspondientes comportamientos con el objetivo de buscar la red de alimentación óptima.

Se ha estudiado el diseño y comportamiento de las Secciones de Schiffman y su capacidad de mejorar la respuesta de fase y la adaptación de la red debido a sus características de acoplo electromagnético. Con ello, el stub en T que es una variante compacta de las Secciones de Schiffman también mejora las características de la red con un tamaño más reducido para casos en los que se dispone de poco espacio de diseño, pero da unos resultados algo peores que las propias secciones C.

También se ha contemplado a grandes rasgos el diseño y funcionamiento de una Matriz de Butler, pero no se ha entrado en una mayor profundidad de estudio debido a que no es una red viable para el sistema que se necesita implementar. Esta red puede ser útil cuando se requiera replicar el elemento radiante con la red de alimentación N veces para formar un array de antenas y así poder controlar la dirección del haz de apuntamiento de cada elemento.

Se ha estudiado en gran profundidad los diseños de los circuitos acopladores híbridos Branch-Line y Rat-Race, los cuales sí permiten diseñar una red de alimentación que es capaz de alcanzar los requisitos marcados como objetivo. Se ha estudiado la forma de diseñar los acopladores de manera teórica para comprender su funcionamiento y decidir si son las estructuras necesarias para la red que se busca. Se ha profundizado en la forma de diseñar un Branch-Line y sus características cuando se implementa un único anillo y dos anillos, y se ha estudiado el modelo de tres anillos para dar un mayor ancho de banda, aunque este último no ha sido necesario implementarlo porque se alcanzaba el ancho de banda requerido. En cuanto al Rat-Race, se ha analizado sus características y su forma de diseñarlo en ADS para comprobar los resultados de adaptación, potencia y fase. Una vez se ha diseñado en ADS, se ha procedido a diseñarlo en CST de la forma más aproximada a ADS, con pequeños ajustes, con el fin de optimizar la adaptación, distribución de potencia y diferencia de fase necesaria.

Tras las múltiples estructuras estudiadas, se ha comprobado que la interconexión de acopladores permite alcanzar un amplio ancho de banda, cumpliendo con los requisitos de adaptación y potencia. Al conseguir la igualdad de potencia en todos los puertos de la antena y una correcta adaptación, se verifica que esta arquitectura de red se podría utilizar para el

diseño de nuevas antenas para estaciones de referencia GNSS que requieran operar con los sistemas GPS, GLONASS, Galileo y COMPASS.

Por otro lado, gracias al amplio estudio realizado en el estado de arte, se ha adquirido mucho conocimiento detalle de cómo funcionan los sistemas GNSS, qué sistemas están operativos hoy en día y cuáles están en desarrollo, cómo están organizados los satélites en los diferentes sistemas y qué bandas de frecuencias y modulaciones utilizan. También se ha analizado los diferentes tipos de antenas se utilizan para los Sistemas de Navegación por Satélite y qué tipo de polaridad emplean. Además, gracias a la lectura de artículos y libros, me ha proporcionado mucha visión sobre qué aplicaciones utilizan estos sistemas GNSS y me ha generado nuevas ideas para las cuales se podrían utilizar debido al desarrollo tecnológico de Smart Cities, coches autónomos, explotación de drones, etc. El impacto de estos sistemas de navegación en la vida de las personas es crucial y cada día, con el avance de la tecnología, se contempla con más importancia de desarrollar mejores sistemas.

6.2 Trabajo futuro

Tras el trabajo estudiado y desarrollado en este proyecto, se ha rediseñado la arquitectura de red de alimentación del TFG previo mediante nuevas estructuras que permitan alcanzar los resultados deseados en toda la banda de frecuencias del TFG (de 1.2 GHz a 1.6 GHz).

Algunas de las mejoras que se proponen para el proyecto de diseñar una antena para nuevas estaciones de referencia GNSS son las siguientes:

- Mejorar la fase del cuarto puerto de salida de la red hacia la antena para conseguir un desfase de -270° del cuarto puerto de salida en todo el ancho de banda, ya que en este proyecto no se consigue en las frecuencias de los extremos.
- Corregir la distribución de potencia en los extremos del ancho de banda para conseguir ampliar el rango de trabajo del sistema, de tal forma que las portadoras de las bandas L5, E5a y B2a que se encuentran un poco por debajo de 1.2 GHz estén dentro de la operativa correcta de la antena.
- Una vez realizadas las mejoras comentadas, se puede plantear la fabricación de la red de alimentación y elemento radiante y estudiar la medición de la antena final.
- Gracias a los dipolos implementados en el TFG de Juan Pedro [1], se puede replicar la antena para formar un array, ya que estos dipolos eliminan las corrientes superficiales de la antena. Se propone estudiar diferentes formas de realizar el array de antenas para conseguir unas prestaciones aún mayores y conseguir robustez en el sistema frente a interferencias, colocando el nulo en las direcciones no deseadas y el máximo en la dirección de apuntamiento [19] [20].
- También se propone una vez implementado el array de antenas diseñar una Matriz de Butler para poder manejar la dirección del haz de apuntamiento de la antena mediante la desigual alimentación de los elementos del array [18] [21] [22] [23] .

Referencias

- [1] J. P. L. Lopesino, "Diseño e implementación de una red de alimentación con rotación secuencial para nuevas antenas de estaciones de referencia de sistemas GNSS," 2018.
- [2] A. P. Quintana, "Diseño de antenas para estaciones de GPS mediante parametrización de las corrugaciones de choke," 2016.
- [3] M. P. Fernández, "Desarrollo de una antena de banda ancha para sistemas de navegación por satélite," 2017.
- [4] B. R. Rao, W. Kunysz, R. Fante and K. McDonald, "GPS/GNSS ANTENNAS," Artech House, 2012.
- [5] J. A. A. Rodríguez, "GPS Signal Plan," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan
- [6] GMV, "GPS Space Segment," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Space_Segment
- [7] J. A. A. Rodríguez, "GLONASS Signal Plan," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan
- [8] GMV, "GLONASS Space Segment," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Space_Segment
- [9] J. A. A. Rodríguez, "Galileo Signal Plan," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan
- [10] GMV, "Galileo Space Segment," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Space_Segment
- [11] J. A. A. Rodríguez, "BeiDou Signal Plan," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Signal_Plan
- [12] GMV, "BeiDou Space Segment," 2011.
https://www.gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Space_Segment
- [13] EGSA, "What is SBAS?," 2012. <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>
- [14] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design 4th Edition," Wiley, 1982
- [15] D. M. Pozar, "Microwave Engineering 4th Edition," Wiley, 1990
- [16] J. L. M. Campos, "Antenas y Compatibilidad Electromagnética,"
- [17] J. A. R. Cruz, "Medios de Transmisión,"

- [18] A. S. Prieto, "Diseño de acopladores direccionales de microondas para matrices de Butler," 2009.
- [19] J. L. Volakis, A. J. O'Brien and C. Chen, "Small and Adaptive Antennas and Arrays for GNSS Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, pp. 1221-1232, Junio 2016.
- [20] S. Caizzzone, W. Elmarissi, G. Buchner and N. Sgammini, "Compact 6+1 Antenna Array for Robust GNSS Applications," *International Conference on Localization and GNSS*, Junio 2016.
- [21] G. E. Domínguez, J. M. F. González, P. Padilla y M. S. Castañer, "Matriz de Butler de Banda Ancha en Banda X para Antenas Reconfigurables," *XXVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Septiembre 2011.
- [22] H. Nachouane, A. Najid, A. Tribak and F. Riouch, "Broadband 4x4 Butler Matrix Using Wideband 90° Hybrid Couplers and Crossovers for Beamforming Networks," *International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Abril 2014.
- [23] A. Araujo, D. Pacheco y D. A. Ávila, "Diseño e implementación de una Matriz de Butler 4x4 para formación de haces de una agrupación de antenas," *Congreso I+D+Ingeniería*, Septiembre 2017.
- [24] Thales, "Choke ring antenna,"
- [25] Leica, "AR20 & AR25 choke ring antennas,"
- [26] Leica, "AR10 & AS10 antennas,"
- [27] NovAtel, "GPS-704-X & GPS-713-GGG-N & GPS-703-HV Pinwheel antennas,"
- [28] NovAtel, "GNSS-750 choke ring antenna,"
- [29] Exelis, "DM C146 Series GPS antenna,"
- [30] H. Lee and H. Hwang, "A Harmonic and Size Reduced Ring Hybrid Using Hairpin-type LUCs," *Microwave Journal*, nº6165, Mayo 2008.
- [31] F. G. Ruíz, N. Rodríguez, M. F. Pantoja and S. G. García, "An undergraduate and RF low-profile laboratory," *IEEE Education Engineering*, 2010.
- [32] S. Raut and A. Petosa, "GPS Wideband Microstrip Antenna Array Featuring Compact Schiffman Phase Shifters," *14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and Antenna Electromagnetics Conference*, Julio 2010.
- [33] A.R.A Antenna Research, "FRPA-3,"
- [34] D.Olivares, "Making a Quadrifilar Helix Antenna,"
<https://f4bpp.com/articles.php?lng=en&pg=116&tconfig=0>

- [35] D. A. G. Álvarez, “Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM),” 2008.
- [36] S. Raut and A. Petosa, “Sistemas de posicionamiento por satélite,” 2015. <http://spsaragon1.blogspot.com/2015/08/>.
- [37] J. E. Page and J. Esteban, “Dual-Band Matching Properties of the C-Section All-Pass Network,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, n° 2, Febrero 2013.
- [38] J. E. Page and J. Esteban, “A New Class of Broad-Band Microwave 90-Degree Phase Shifters,” IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 6, Abril 1958.
- [39] J. E. Page, J. Esteban and C. C. Peñalosa, “Lattice Equivalent Circuits of Transmission-Line and Coupled-Line Sections,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, n° 10, Octubre 2011.
- [40] K. V. P. Kumar, R. K. Barik and S. S. Karthikeyan, “A novel two sections branch line coupler employing different transmission line techniques,” AEU – International Journal of Electronics and Communications, vol. 70, pp. 738-742., Mayo 2016.
- [41] Y. H. Chun and J. S. Hong, “Compact Wide-Band Branch-Line Hybrids,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, Febrero 2006.
- [42] S. Rodríguez, A. Fajardo and C. Paez, “Characterization of the Branch-Line and Rat-Race ideal hybrids through their merit parameters,” IEEE Second Latin American Symposium on Circuits and Systems, Febrero 2011.
- [43] A. E. Popugaev, “A Family of High-Performance GNSS Antennas,” Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, Septiembre 2015.
- [44] A O. Kiris, K. Topalli and L. Kuzu, “A Wideband Circularly Polarized GNSS Antenna for Satellite Platforms,” International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Abril 2019.

Glosario

GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System (EEUU)
GLONASS	Global Navigation Satellite System (Rusia)
Galileo	Sistema de navegación europeo
COMPASS	Sistema de navegación chino
SBAS	Satellite-Based Augmentation Systems
WAAS	Wide Area Augmentation System (EEUU)
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
MSAS	Multifunctional Satellite-Based Augmentation System (Japón)
GAGAN	GPS and Geoaugmented Navigation (India)
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System (China)
WADGPS	Wide Area Differential Global Positioning System (Corea del Sur)
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring (Rusia)
FRPA	Fixed Radiation Pattern Antenna
RHCP	Right Hand Circular Polarization
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

Anexos

A Conceptos teóricos

El proyecto es continuación de los TFGs anteriores de Adrián Pérez Quintana [2], María Pablo Fernández [3] y Juan Pedro López Lopesino [1]. En este TFG se tiene por objetivo rediseñar la red de alimentación que comenzó implementando Juan Pedro para conseguir que opere en un ancho de banda de 1.2 GHz a 1.6 GHz, manteniendo una buena relación axial, estabilidad de centro de fase y distribución de potencia.

Para ello, primero es necesario comprender diferentes conceptos teóricos que se tratan a lo largo del documento. A continuación, se muestran los conceptos claves necesarios de conocer para comprender el diseño y las mejoras realizadas en el proyecto.

A.1 Teoría de antenas

I. Definición de antena

Dispositivo “metálico” capaz de radiar y recibir ondas de radio electromagnéticas, que además adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor al medio [16].

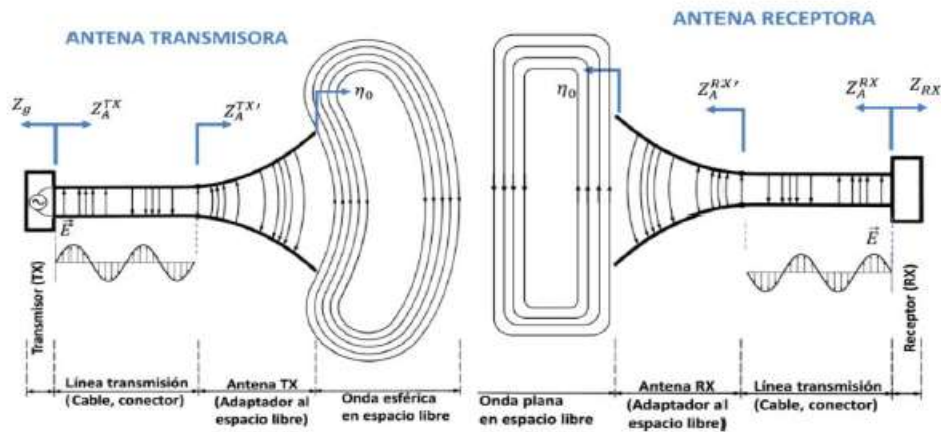


Figura 0-1: Definición antena [16]

II. Diagrama de radiación

Representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas angulares del espacio [16].

El diagrama se compone de una serie de lóbulos.

- **Lóbulo principal:** contiene la dirección máxima de radiación.
- **Lóbulos secundarios:** son los lóbulos distintos al principal.
- **Lóbulos laterales:** son los lóbulos secundarios que se encuentran adyacentes al lóbulo principal.
- **Lóbulo posterior:** lóbulo situado aproximadamente a 180° respecto del principal.

III. Condición de campo lejano

Es la distancia mínima a la que se debe situar una antena bajo prueba y la sonda de medida. Esta distancia es necesaria tenerla en cuenta a la hora de realizar el análisis en una cámara anecoica o recinto de pruebas de una antena fabricada. A esta distancia se considera la calidad de radiación de la antena lo suficiente buena como para definir y analizar su diagrama de radiación.

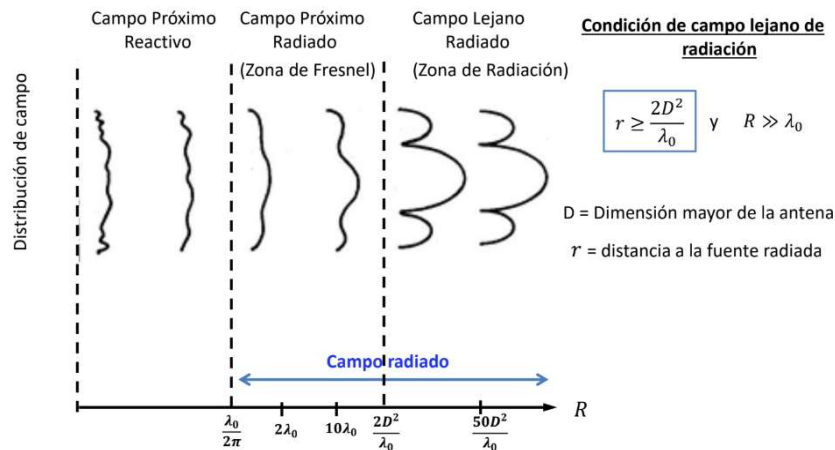


Figura 0-2: Definición campo lejano [16]

IV. Polarización y relación axial

La **polarización** del campo eléctrico radiado en la dirección de máxima radiación es la figura que traza en función del tiempo, para una dirección fija, el extremo del vector del campo radiado y su sentido de giro, visto por un observador desde la antena [16].

La polarización puede ser **lineal** si el campo que se proyecta se realiza sobre una recta, **circular** si el vector realiza un movimiento circular (puede ser a derechas o a izquierdas, polarizaciones las cuales no son compatibles entre sí) o **elíptica** si el vector proyectado se mueve sobre una elipse.

Para las antenas GNSS, es de una gran importancia que la radiación de la antena siga una polarización circular a derechas (RHCP), ya que todas las antenas de los sistemas GNSS utilizan esta polarización a la hora de radiar.

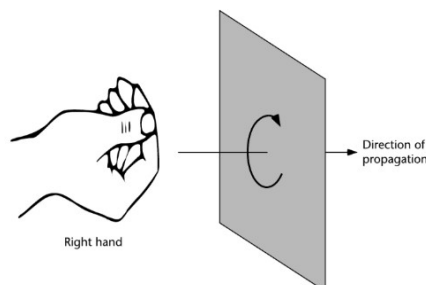


Figura 0-3: Polarización circular a derechas (RHCP) [4]

La **relación axial** es la relación de las componentes ortogonales del campo eléctrico que se propaga. Para poder obtener una polarización circular, la relación axial debe ser unitaria.

V. Centro de fases

El centro de fases de una antena de geoposicionamiento es el punto espacial de transmisión o recepción de la señal. Para escoger si el punto de referencia es de transmisión o de recepción, es necesario saber si la antena será una antena transmisora o receptora.

A.2 Teoría de redes de alimentación

I. Parámetros S

En un circuito de N puertas, donde cada puerta es una entrada o salida, se definen para cada puerta ondas de potencia incidentes al circuito (a_i) y ondas de potencia reflejadas del circuito (b_i). Además, las puertas tienen asociadas una impedancia característica, denominada Z_0 . La Figura 0-4 muestra un esquema del concepto de un circuito con sus respectivas ondas de potencia.

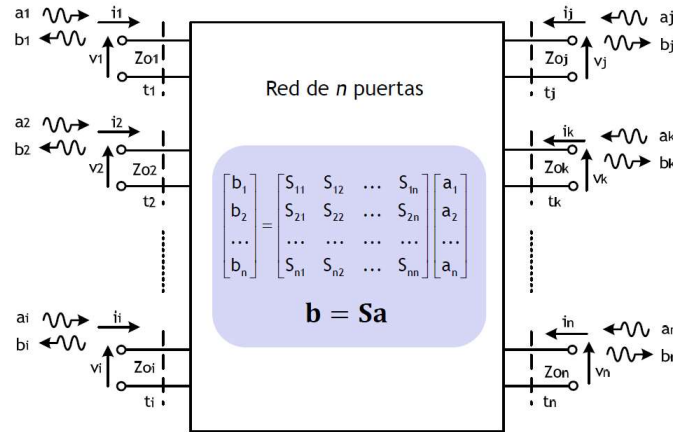


Figura 0-4: Parámetros S [17]

A su vez, estas ondas de potencia vienen definidas por las siguientes expresiones (4) y (5), las cuales se observa que dependen de los valores de tensión y de corriente que hay en cada puerta y la impedancia característica de la línea [17].

$$a_k = \frac{v_k + i_k Z_{0k}}{\sqrt{8Z_{0k}}} \quad (4)$$

$$b_k = \frac{v_k - i_k Z_{0k}}{\sqrt{8Z_{0k}}} \quad (5)$$

Por último, se definen como parámetro de Scattering, o más conocidos como parámetros S, a la relación existente entre las ondas de potencia incidentes y reflejadas del circuito. Dichos parámetros vienen definidos por las siguientes expresiones (6) y (7), donde S_{ii} son

los coeficientes de reflexión y S_{ij} son los coeficientes de transmisión. La adaptación de una red de alimentación viene dada por el parámetro S_{11} del circuito [17].

$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} \quad \text{si } a_k = 0, k \neq i \quad (6)$$

$$S_{ji} = \frac{b_j}{a_i} \quad \text{si } a_k = 0, k \neq i \quad (7)$$

II. Línea de transmisión

Se define como línea de transmisión al medio de transmisión guiado por soporte físico que soporta un modo TEM, y que se maneja con el formalismo de ondas de tensión y corriente. La línea de transmisión viene definida por los parámetros de la constante de propagación (γ_0), impedancia característica (Z_0) y la longitud (d) [17].

III. VSWR

El parámetro VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) es una medida de eficiencia en relación a la potencia transmitida de una fuente a una carga en una línea de transmisión. Está fuertemente relacionado con el concepto de onda estacionaria [17].

IV. Stripline

La tecnología stripline es una tecnología planar que consiste en la utilización de líneas de transmisión rodeadas completamente por sustrato dieléctrico y disponen de un plano de masa tanto en la parte superior de la estructura como en la parte inferior.

B Antenas GNSS comerciales

En este anexo se van a nombrar algunas de las antenas que se encuentran en el mercado, utilizadas para sistemas GNSS. Algunos de los proveedores más importantes en esta área son Thales, Leica, NovAtel y Exelis.

- **Thales Choke Ring Antenna:** la antena consiste en un plano de tierra con cinco estructuras de anillo concéntricas, un dipolo (Dorne-Margolin C146-10) y un amplificador de bajo ruido. Esta antena es utilizada por múltiples redes de navegación por satélite, entre las que se encuentran la red GPS implementada en el sur de California o la unidad de sismología de China [24].
- **Leica AR25 Choke Ring Antenna:** esta antena se compone de una estructura de anillos de choke junto a un dipolo de banda ultra ancha Dorne-Margolin. La ganancia de la antena se ha mejorado para que pueda utilizarse con la mayoría de los sistemas receptores geodésicos. La antena es capaz de seguir a los satélites cuando se encuentran en el marco de visibilidad, en el horizonte e incluso por debajo del horizonte [25].
- **Leica AR20 Choke Ring Antenna:** la antena Leica AR20 está diseñada para operar en todas las bandas de los sistemas GNSS actuales y futuros. Su estructura de chokes 3D con diferentes niveles de profundidad y anchura permiten obtener una precisión muy alta debido a la estabilidad del centro de fases [25].

- **Leica AR10 Integrated Antenna:** la principal característica de la antena Leica AR10 reside en disponer de precisión de centro de fases, supresión de multipath y un buen seguimiento a baja altura. Su estructura protectora permite evitar el acumulamiento de nieve o posicionamiento de pájaros encima de la estructura, principales fuentes de atenuación de señal en estructuras circulares. La antena opera con todos los sistemas GNSS actuales y los que están en desarrollo [26].
- **Leica AS10:** es una antena compacta para estaciones de referencia GNSS y redes RTK. La principal característica es su reducido tamaño, facilidad para ser instalada en multitud de dispositivos y su estabilidad de centro de fases. Está diseñada para operar con los sistemas GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou [26].
- **NovAtel GPS-704-X:** la antena cuenta con el elemento radiante de NovAtel Pinwheel utilizado por su alta flexibilidad en aplicaciones y su reducido coste. Es capaz de manejar tres frecuencias simultáneas y está diseñado para operar en las constelaciones de GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou [27].
- **NovAtel GPS-713-GGG-N:** la antena cuenta con la tecnología NovAtel Pinwheel y sus principales características son: excelente rechazo del multitrayecto, manejo simultáneo de hasta tres frecuencias y elevada precisión del centro de fases. Es muy utilizada para transmisores Inmarsat (operaciones marines) y es compatible con GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou [27].
- **NovAtel GPS-703-GGG-HV:** la antena cuenta con la tecnología NovAtel Pinwheel y sus principales características son similares a las de la antena anterior presentada. La característica que distingue a esta antena de la anterior es su capacidad para operar con alta fiabilidad en condiciones de altas vibraciones. Es compatible con los sistemas GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou [27].
- **NovAtel GNSS-750:** la antena está diseñada mediante una estructura 3D de chokes y de un dipolo Dorne-Margolin de tal forma que presenta una alta estabilidad del centro de fases, amplio ancho de banda, seguimiento de satélites en el margen de visión (tanto en el horizonte como por encima y por debajo), altas prestaciones incluso en entornos no favorables y no se necesita rediseñar para futuras aplicaciones. La antena es compatible con todos los sistemas [28].
- **Exelis DM C146 Series GPS Antenna:** la antena DM C146 de Exelis ha sido diseñada mediante un elemento radiante de banda ancha y una red de alimentación en cuadratura de fase. La antena opera en L1 y L2 y algunas de sus características importantes son estabilidad de centro de fases y buena relación axial [29].



Figura 0-5: Antenas comerciales GNSS

C Secciones de Schiffman

Las Secciones de Schiffman son un tipo de stub muy utilizado para diseñar redes de alimentación. Consta de utilizar dos líneas de transmisión de la misma longitud eléctrica ($\lambda/4$) paralelas entre sí, muy próximas y conectadas por uno de sus puertos. La sección más común utilizada es la sección C, pero también se ha estudiado un tipo de stub más compacto denominado stub en T.

Este tipo de circuito transmite la potencia por toda la línea de transmisión, pero debido a la proximidad de las dos líneas que componen la sección, se produce un acoplo electromagnético que mejora la adaptación del circuito.

Cabe destacar que este tipo de stub no solo se utiliza para mejorar la adaptación de algunas redes de alimentación, sino que también se hace uso de él para aplanar la diferencia de fase entre dos puertos para conseguir un poco más de ancho de banda y también para conseguir unos acoplos electromagnéticos específicos.

En cuanto al stub en T, se parte de una sección C la cual, en vez de tener dos líneas de transmisión de longitudes $\lambda/4$, se compone de tres líneas de transmisión con dos de ellas de longitudes $\lambda/8$ en forma de L y la línea que conecta esas dos tiene longitud de $\lambda/4$. El diseño del stub en T permite aproximadamente mantener las características de ancho de banda de la sección C con una mejora en la adaptación del parámetro S_{11} . Además, se logra una optimización del espacio utilizado.

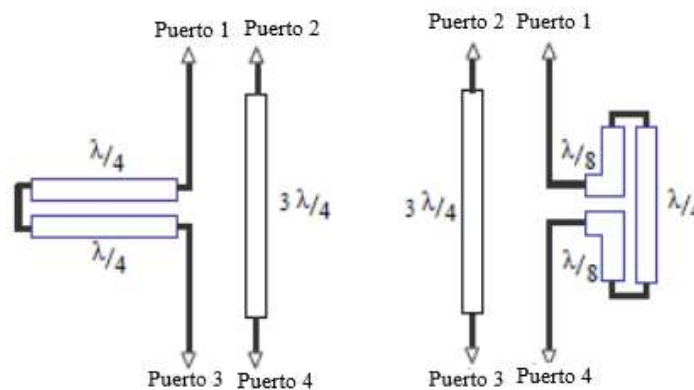


Figura 0-6: Secciones Schiffman y stub en T [32]

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

A continuación, se muestran las distintas combinaciones de las Secciones de Schiffman que se han utilizado para la arquitectura de red de un híbrido Branch-Line y dos divisores de potencia.

C.1 Dobles secciones C

En esta subsección del anexo se procede a explicar cómo se han diseñado los divisores con las dobles secciones C, con el objetivo de conseguir un mayor ancho de banda para la red de alimentación y así cumplir los requisitos del sistema.

Partiendo del proyecto de ADS del TFG de Juan Pedro [1], se procede a analizar el esquemático y simularlo para observar los resultados. Una vez realizado, se procede a implementar una Sección C seguida a continuación de la que ya está implementada. Esta doble sección se observa en la Figura 0-7.

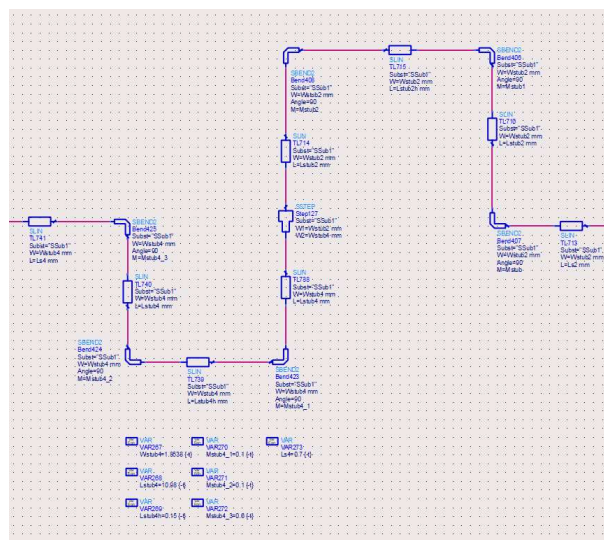


Figura 0-7: Esquemático doble sección C

En la siguiente Figura 0-8 se muestra el esquemático completo del divisor vertical. Solo se va a analizar uno de los dos divisores, ya que la implementación es exactamente igual tanto para uno como para otro. Es importante destacar que para la implementación de la Sección C hay que tener en cuenta las impedancias a los extremos de la línea de transmisión y, de esta forma, adaptar lo mejor posible el circuito.

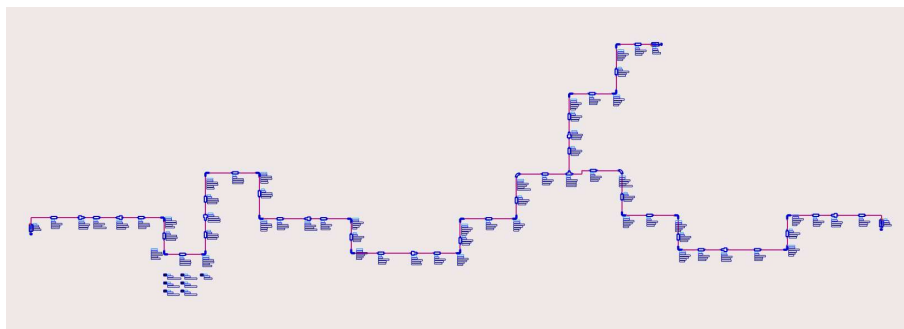


Figura 0-8: Esquemático stub vertical con doble sección C

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

El layout del divisor se muestra en la Figura 0-9. Se puede observar cómo de las dos salidas que tiene el divisor de potencia, una de ellas contiene a la doble Sección C, con longitud $\lambda/4$ cuartos. Con esta prolongación de línea se consigue obtener un desfase entre ambos puertos de salida del circuito.

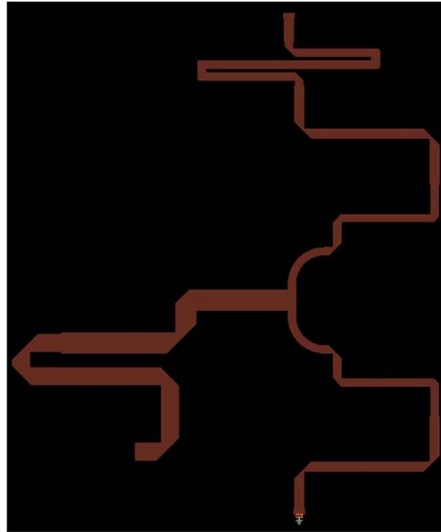


Figura 0-9: Layout divisor con doble sección C

Una vez se ha mostrado el esquemático en ADS y el layout del circuito resultante, el resultado de la simulación del divisor en adaptación y fase es el que se muestra en la Figura 0-10 de a continuación.

Como se puede observar, la fase no cumple con los requisitos del sistema, ya que en el ancho de banda se aprecia una pendiente demasiado pronunciada. En concreto, se necesitaría tener una diferencia de fase de 90° con un error máximo de 10° de diferencia en todo el ancho de banda, objetivo el cual es lejano para este diseño.

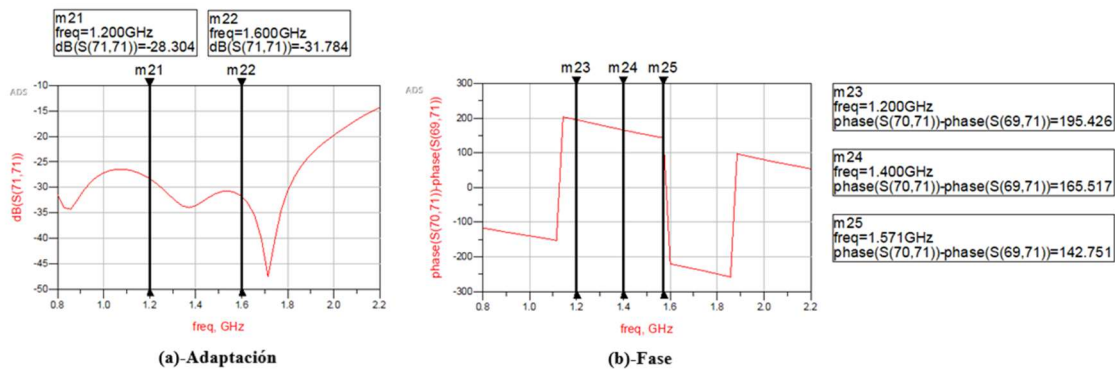


Figura 0-10: Simulación divisor con doble sección C

C.2 Stub en T y doble stub en T

En esta subsección del anexo C, se pasa a analizar el diseño de un único stub en T. Para diseñarlo, se ha sustituido en el esquemático la doble sección C por el stub compacto. El esquema del stub en T en ADS es el que se muestra en la Figura 0-11. Como se explica

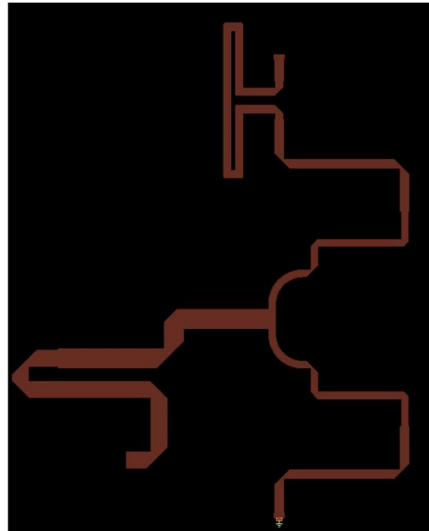


Figura 0-13: Layout divisor con stub T

Tras la simulación del divisor, se observa que el utilizar el stub en T da un resultado similar en términos de adaptación, pero el ancho de banda que proporciona el diseño de doble Sección C es ligeramente mejor. Se puede observar en la Figura 0-14 que se muestra a continuación.

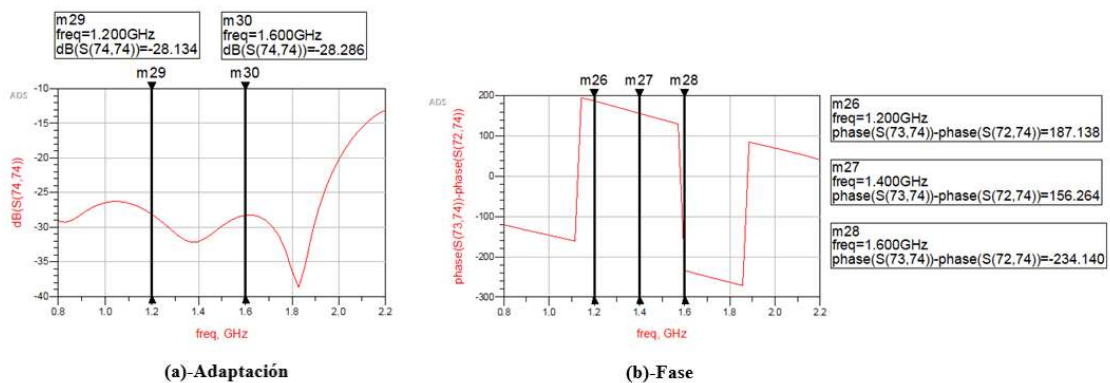


Figura 0-14: Simulación divisor con stub T

También se ha analizado el diseño con un doble stub en T, ya que teóricamente se consigue una mejora en el ancho de banda al colocar dos stubs consecutivos, debido a los acoplos electromagnéticos [32]. El esquemático del divisor resultante sería el siguiente que se muestra en la Figura 0-15.

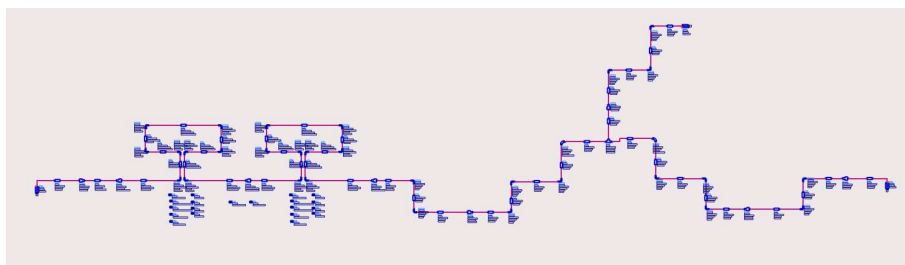


Figura 0-15: Esquemático divisor vertical con doble stub en T

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

El layout del esquemático anterior es el que se muestra en la Figura 0-16. Aquí se puede observar una gran diferencia de longitud entre ambos puertos de salida, lo que le proporciona al circuito un exceso de longitud y provoca que la respuesta en fase que se analizará a continuación sea peor.

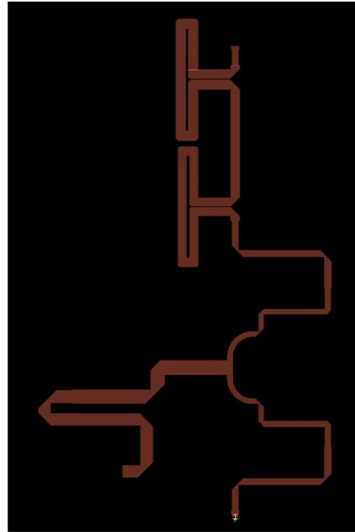


Figura 0-16: Layout divisor con doble stub T

Como se comprueba a continuación, la simulación de los dos elementos consecutivos no da una respuesta óptima. De hecho, es la respuesta más alejada a los objetivos que se buscan, siendo la versión del divisor de potencia con peor respuesta. Esto se debe al exceso de línea que hay en el puerto de salida desfasado, como se ha mencionado anteriormente.

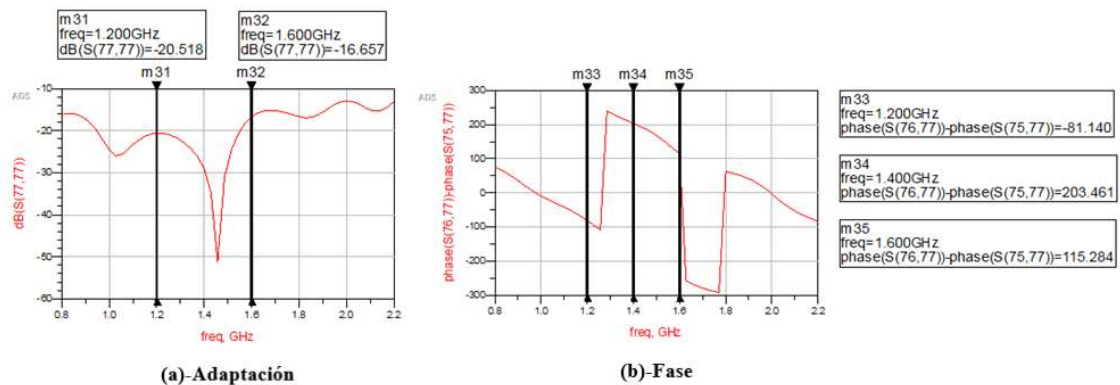


Figura 0-17: Simulación divisor con doble stub T

C.3 Combinación de sección C y stub en T

La última versión de diseño del divisor que se ha analizado en el proyecto es una combinación de una sección C y un stub en T. El esquemático del divisor se muestra en la Figura 0-18 de a continuación. Al igual que en los casos anteriores, ha sido necesario diseñar ambos stubs por separado y adaptarlos para, posteriormente, incluirlos en el divisor y no estropear la respuesta de adaptación del circuito.

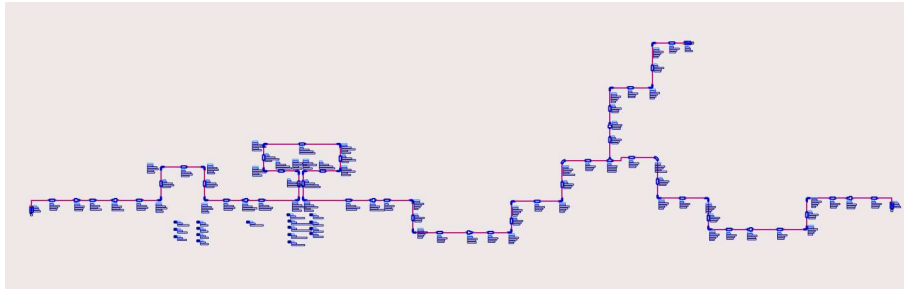


Figura 0-18: Esquemático divisor vertical con stub T y sección C

El layout del esquemático es el que se observa en la Figura 0-19. En esta ocasión también se puede apreciar claramente cómo hay un exceso de longitud de línea de transmisión en el puerto desfasado (comparándolo con el caso de la doble Sección C que es el circuito que mejor respuesta da de los analizados), por lo que la respuesta en fase del divisor será peor.

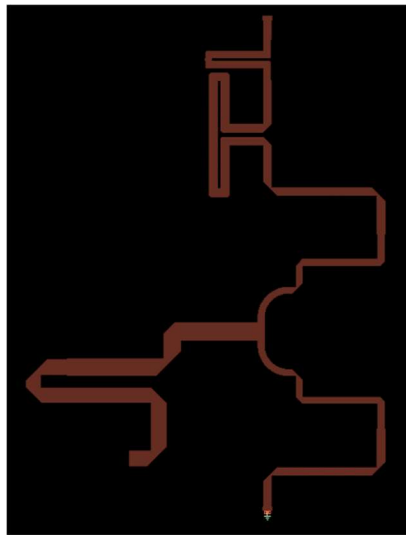


Figura 0-19: Layout divisor con stub T y sección C

Como se puede observar en la Figura 0-20, la gráfica de la diferencia de fase tiene una pendiente muy pronunciada, lo que implica que no es un diseño válido para cumplir los requisitos del sistema. Aunque se puede observar que la diferencia de fase que se muestra en la gráfica de la derecha está lejos de los 180° necesarios, eso se puede corregir fácilmente editando levemente las longitudes de los stubs que se han añadido, pero no se ha realizado porque este diseño no puede ser válido debido a la diferencia de fase tan abrupta entre las frecuencias inferior y superior del ancho de banda de trabajo. Se necesitaría que la fase presentase una zona prácticamente plana.

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

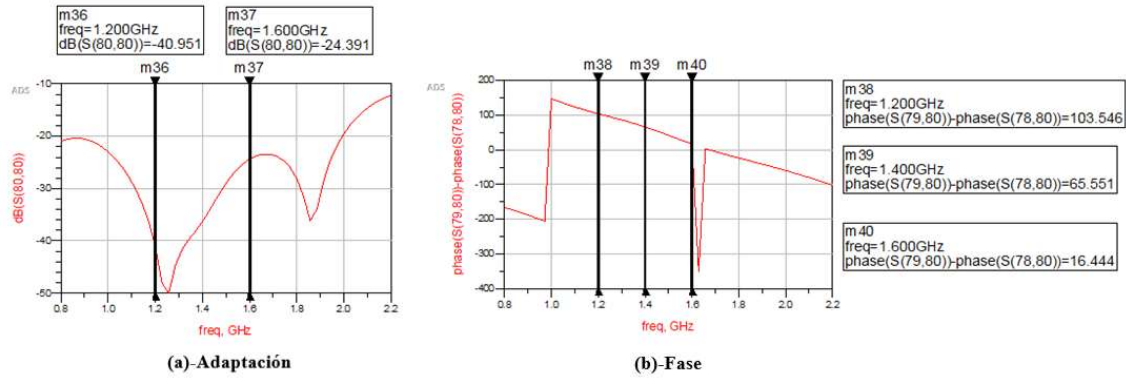


Figura 0-20: Simulación divisor con doble stub T

Teniendo en cuenta todos los diseños anteriores, el que mejor resultado ofrece es el divisor con dos Secciones C, pero no termina de ser un diseño válido para los requisitos del sistema ya que la diferencia de fase entre las frecuencias inferior y superior respecto a la central es de más de 20° . Este error es un valor demasiado alejado para poder dotar a la antena de una polarización circular a derechas óptima en todo el espectro de frecuencias en el que trabaja la antena.

D Teoría de Matriz de Butler y layout

Originalmente la red de Butler se utiliza para alimentar a un array de antenas, no para alimentar a una única antena. Por ese motivo no se ha buscado en este TFG implementar exactamente la red de Butler, sino adaptar la estructura de dicha red para conseguir por medio de una entrada la rotación secuencial.

Partiendo del Branch-Line diseñado por Juan Pedro [1], se replica dicho híbrido para colocarlos en las esquinas de la red de alimentación y se diseña otro Branch-Line diferente para colocarlo como elemento central e intentar conseguir la máxima estabilidad de fase. El layout de la red es el que se muestra en la Figura 0-21 de a continuación.

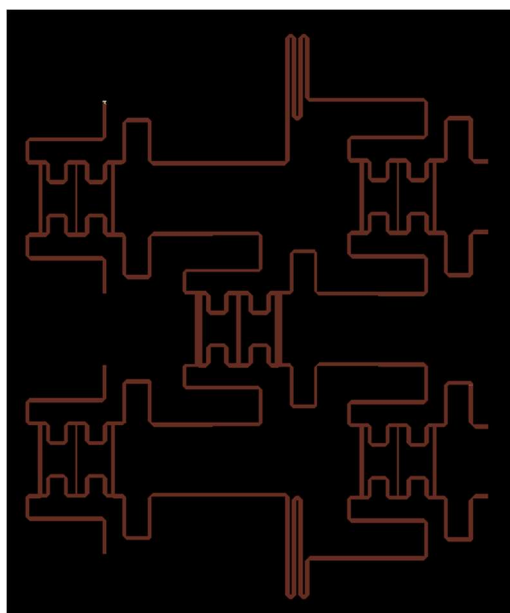


Figura 0-21: Layout Matriz de Butler

Tras la simulación del circuito, se ha comprobado que no había ninguna estabilidad en la diferencia de fase de los puertos de salida, por tanto, no se agregan los resultados a la memoria.

La Matriz de Butler es una red de formación de haz que se utiliza para alimentar a un array de N antenas, siendo N una potencia de 2. La ventaja de este tipo de red es la capacidad de redireccionar la potencia de entrada al elemento que se quiera alimentar, y el resto de los elementos no activarlos. Además, también se podrían activar todos los elementos al mismo tiempo.

La red se compone de cuatro híbridos acopladores de 90° en los extremos y de un elemento central denominado crossover que permite el direccionamiento de la potencia a cualquiera de los cuatro puertos de salida. Además, hay dos desfases en los extremos superior e inferior de la red. El crossover está formado por híbridos Branch-Line interconectados en cascada, aunque último no se ha tenido en cuenta en este diseño ya que no se requiere un redireccionamiento de potencia.

Este tipo de red de alimentación puede ser útil cuando en proyectos futuros se genere la estructura del array de antenas y se necesite una alimentación para seleccionar qué elementos activar para redireccionar el haz.

E Resultados red de híbridos en cascada

En este anexo se muestra la estructura de acopladores híbridos Branch-Line diseñada y con las simulaciones en ADS, con el fin de alcanzar el objetivo de amplio ancho de banda. Para diseñar esta topología de red, primero se ha diseñado por separado cada acoplador híbrido para conseguir aproximadamente la potencia que se requiere en cada uno, siguiendo el esquema de potencias que se muestra en la sección 3.2.3 del tercer capítulo. Una vez se diseñan los tres acopladores por separado, se procede a unirlos y a implementar secciones C hasta conseguir el desfase progresivo de 90° del primer puerto de salida al último. En la Figura 0-22 se muestra el esquemático de los acopladores conectados en cascada y con sus respectivas secciones C a la salida para ajustar el desfase de la red.

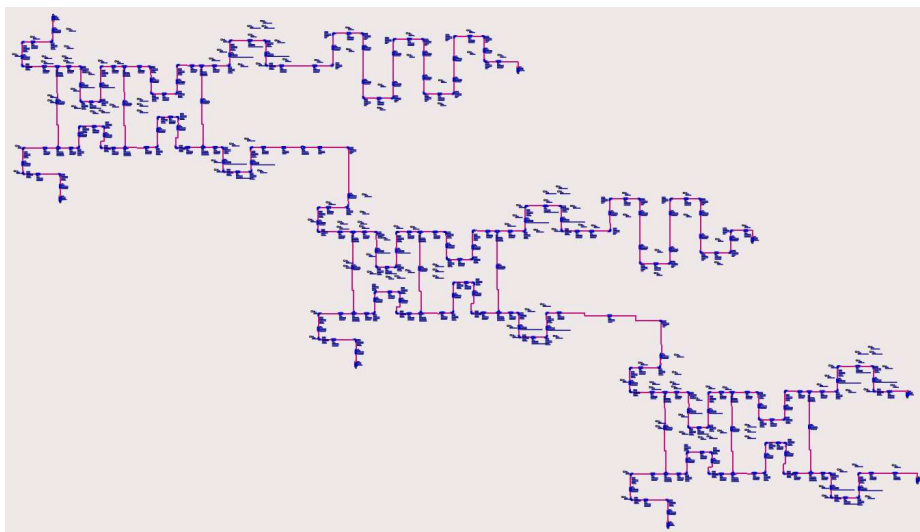


Figura 0-22: Esquemático de red de Branch-Lines en cascada

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

El layout de la topología quedaría como se muestra en la Figura 0-23 de a continuación. Cabe destacar que las prolongaciones de las dos primeras salidas se han realizado con Secciones C para mejorar la adaptación de la red, tal y como se estudió en el anexo C. La interconexión de los híbridos se puede acortar para obtener una mejor respuesta, pero este paso no se ha llegado a realizar ya que el diseño no presenta unos resultados correctos como para elegir esta red como la topología de la antenna.

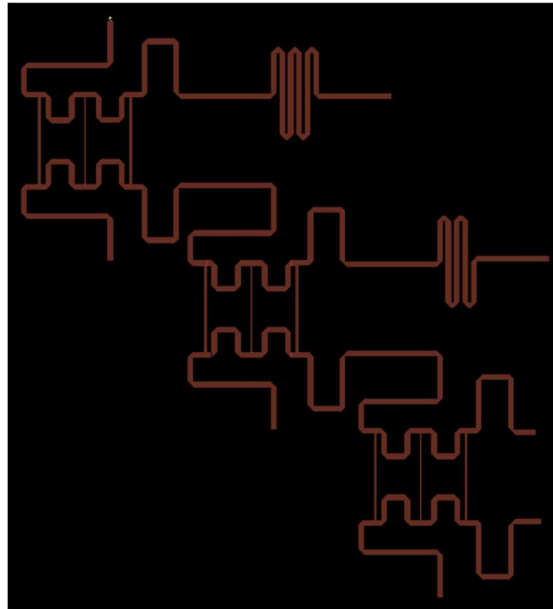


Figura 0-23: Layout de red de Branch-Line en cascada

En la Figura 0-24 se muestra la adaptación de la red simulada. El parámetro S_{11} que corresponde con la adaptación es el parámetro $S(93,93)$ que se observa en la gráfica. Al estar por debajo de -14 dB, se considera que la adaptación de la red es aceptable para los requisitos del sistema, aunque se observa una gran fluctuación en todo el ancho de banda de dicho parámetro.

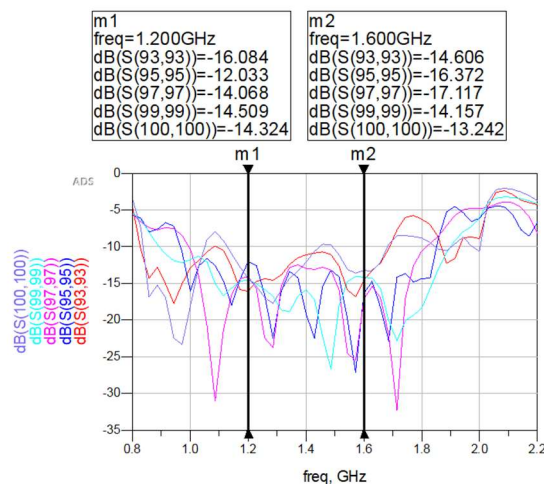


Figura 0-24: Adaptación red de Branch-Lines en cascada

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

En segundo lugar, se muestra la distribución de potencia de la red en la Figura 0-25. Los parámetros S_{21} , S_{31} , S_{41} y S_{51} deben de tener aproximadamente la misma potencia entregada, ya que estos son los parámetros S de transferencia de potencia a la antena desde el puerto de entrada a la red. Los parámetros S_{61} , S_{71} y S_{81} no deben entregar potencia. En la simulación, se asocian a los parámetros S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{51} , S_{61} , S_{71} y S_{81} los parámetros $S(95,93)$, $S(97,93)$, $S(99,93)$, $S(100,93)$, $S(94,93)$, $S(96,93)$ y $S(98,93)$ respectivamente. Se puede apreciar que la distribución de potencias actúa como lo esperado, pero para el parámetro S_{61} hay un pico de transmisión de potencia a la frecuencia central de la banda (1.4 GHz). Este comportamiento no es correcto.

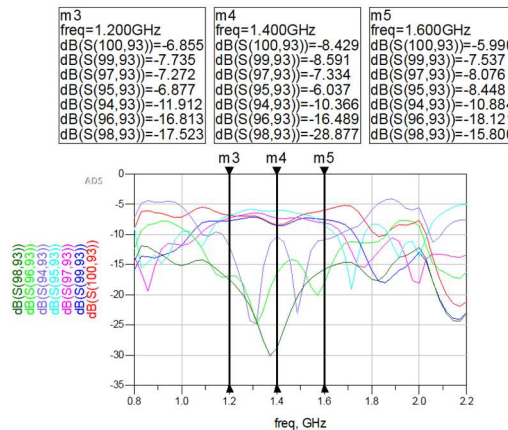


Figura 0-25: Potencia red de Branch-Line en cascada

Por último, se muestra la respuesta en fase de la red. Para analizar dicha respuesta, se ha realizado la diferencia de fase de cada puerto de salida respecto al primero de ellos, que se ha tomado como referencia. Como se ha comentado anteriormente, las prolongaciones de las salidas del circuito se han diseñado acorde a este resultado, para conseguir un desfase progresivo entre los cuatro puertos de salida.

Se puede comprobar que el resultado de la diferencia de fase no es bueno para los requisitos de la red. Aunque se observa una tendencia de resultados más cercanos a los requeridos para las tres frecuencias analizadas (las dos frecuencias de los extremos y la central), los saltos que se producen en el ancho de banda para cada diferencia de fase entre los puertos de salida hacen que no sea un diseño válido. Se necesita estabilidad de fase y esta estructura no lo presenta. Por este motivo, esta topología de red queda descartada.

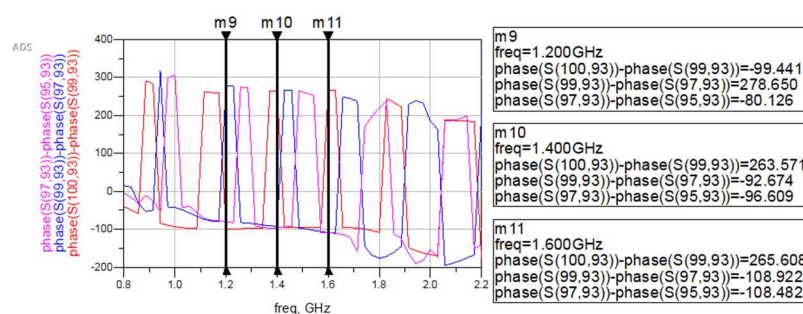


Figura 0-26: Diferencia de fase red de Branch-Line en cascada

F Diseño de red final

En este anexo F se muestra el diseño paso a paso de los tres elementos y la unión de la red final. En primer lugar, se mostrará el diseño de Branch-Line, posteriormente los Rat-Race y, finalmente, la unión.

Partiendo de las ecuaciones expuestas en el cuarto capítulo de diseño, se han obtenido las impedancias necesarias y se ha diseñado el esquemático del Branch-Line de dos anillos en ADS. De esta forma, se disponía de una serie de impedancias fijas y otras impedancias variables, por lo que una vez implementadas la anchura y longitud resultantes de introducir las impedancias en LineCalc, basta con retocar un poco dichas anchuras variables para conseguir una buena adaptación y distribución de potencia. La longitud no ha sido necesario retocarla puesto que es un valor fijo para obtener un desfase de 90° .

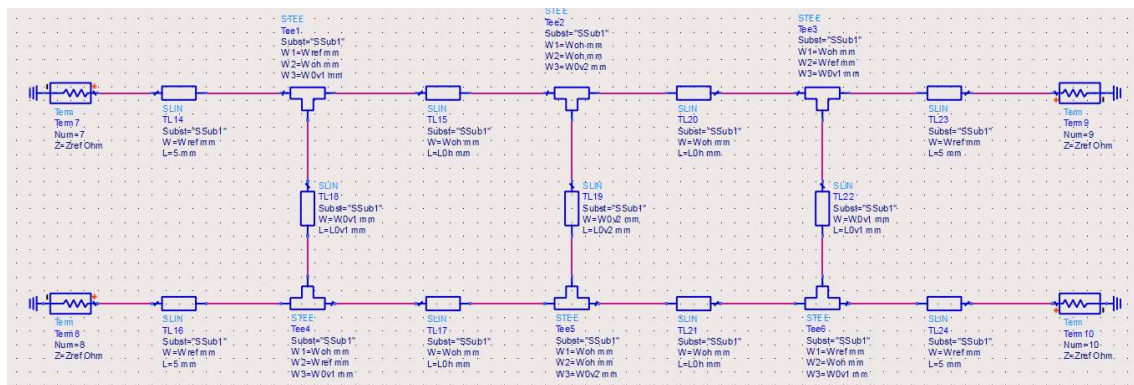


Figura 0-27: Esquemático del Branch-Line final ADS

Por otro lado, para diseñar el híbrido Rat-Race, primero se ha diseñado un anillo de la impedancia característica mostrada en el capítulo cuatro. Para ello, se han implementado cuatro codos circulares en el esquemático con unos ángulos determinados para conseguir tener una longitud de $\lambda/4$ entre los puertos, y, por consiguiente, una longitud de tres $\lambda/4$ entre los puertos enfrentados.

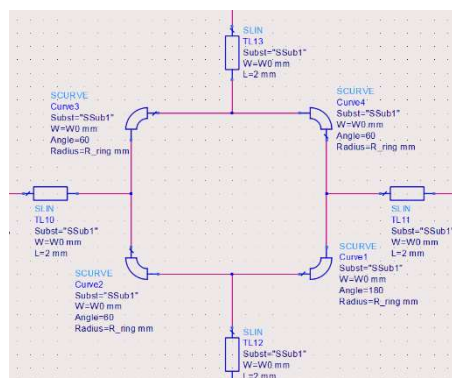


Figura 0-28: Esquemático del anillo del Rat-Race final ADS

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

Una vez implementado el anillo, se procede a adaptar el circuito. Para ello, mediante transformadores lambda cuartos, se realiza la adaptación de la impedancia a la salida del anillo a la impedancia de referencia necesaria.

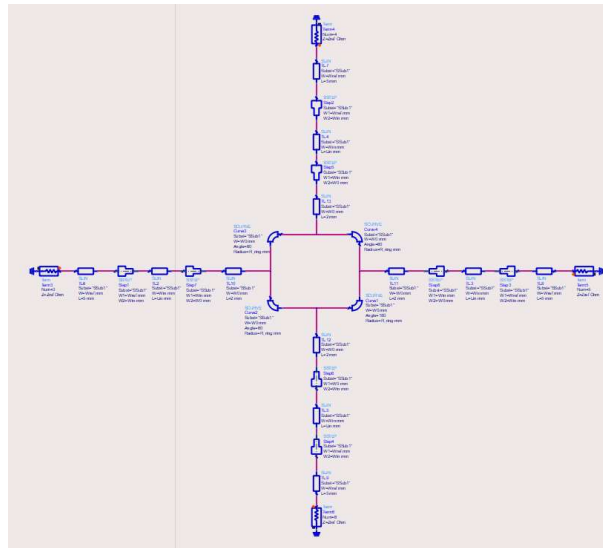


Figura 0-29: Esquemático del Rat-Race final ADS

Una vez comprobado que la adaptación y la distribución de potencia es correcta en cada circuito por separado, se procede a unir los tres circuitos y desfase 90° los dos Rat-Race diseñados mediante la implementación de un stub de longitud lambda cuartos en una de las salidas del Branch-Line.

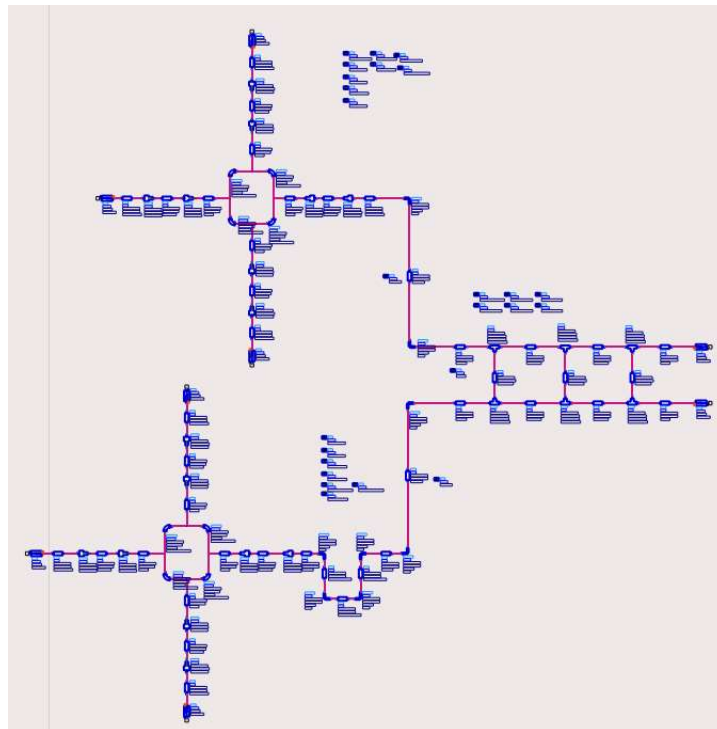


Figura 0-30: Esquemático de la red unida final ADS

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

En este punto ha sido necesario reajustar un poco algún valor de anchura y longitud del circuito para mantener una buena adaptación y distribución de potencia, además de verificar que dos de los puertos de salida tienen que estar desfasados 90° respecto a los otros dos.

A continuación, se procede a desfasar 90° uno de los puertos de salida respecto al otro de cada Rat-Race para conseguir ese desfase secuencial objetivo del proyecto. De esta forma, el puerto de salida 2 tendrá un desfase de 90° respecto al puerto de salida 1, el puerto de salida 3 tendrá un desfase de 180° respecto al puerto de salida 1 y el puerto de salida 4 tendrá un desfase de 270° respecto al puerto de salida 1. Para ello, se implementa mediante Secciones C el desfase de 90° en los puertos de salida 2 y 4 de la red de alimentación, cuyo esquema resultante es el que se muestra en la Figura 0-31.

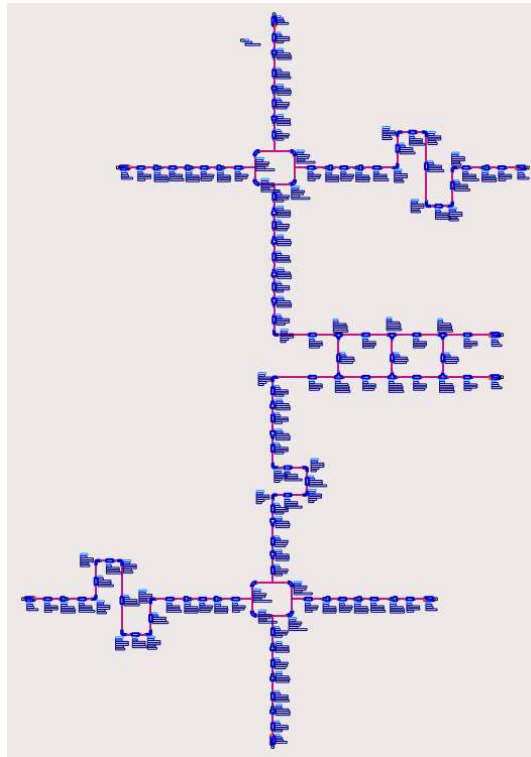


Figura 0-31: Esquemático de la red unida final con desfase progresivo ADS

Una vez retocado algún parámetro de la red y verificar los resultados finales, se toma nota de dichos valores y se procede a diseñar la red de alimentación por separado en CST, donde se han diseñado los tres circuitos parametrizando las dimensiones de la red y simulando estos circuitos por separado, sin vías de por medio.

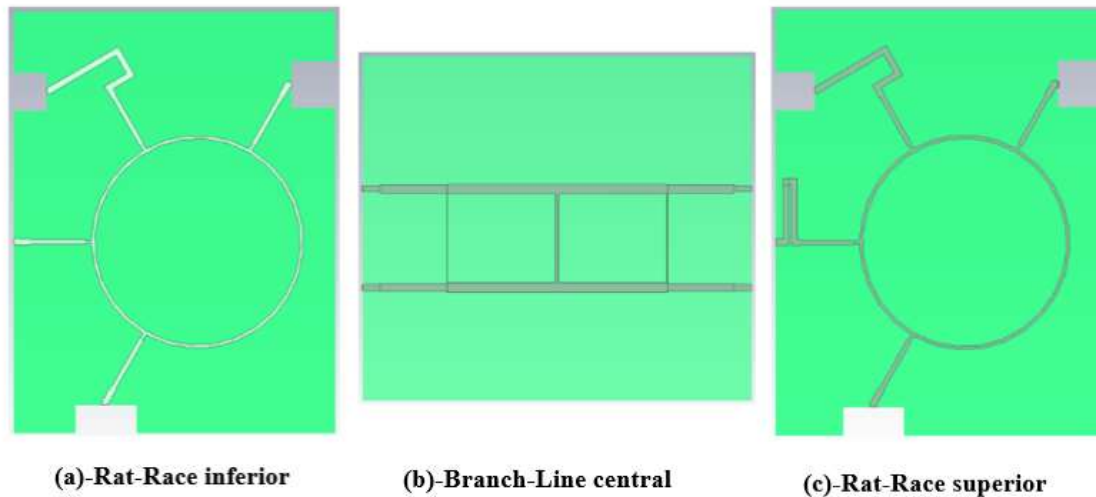


Figura 0-32: Acopladores híbridos separados CST

Una vez se han optimizado los diseños retocando algunas anchuras y longitudes y simulados, se procede a unirlos mediante las vías del proyecto. Para ello, se han retocado las impedancias de las vías hasta conseguir la misma impedancia que en la salida de los circuitos (48Ω) y se ha diseñado una vía triple para atravesar tres capas de stripline. El interior de la red resultante es la que se muestra a continuación en la Figura 0-33.

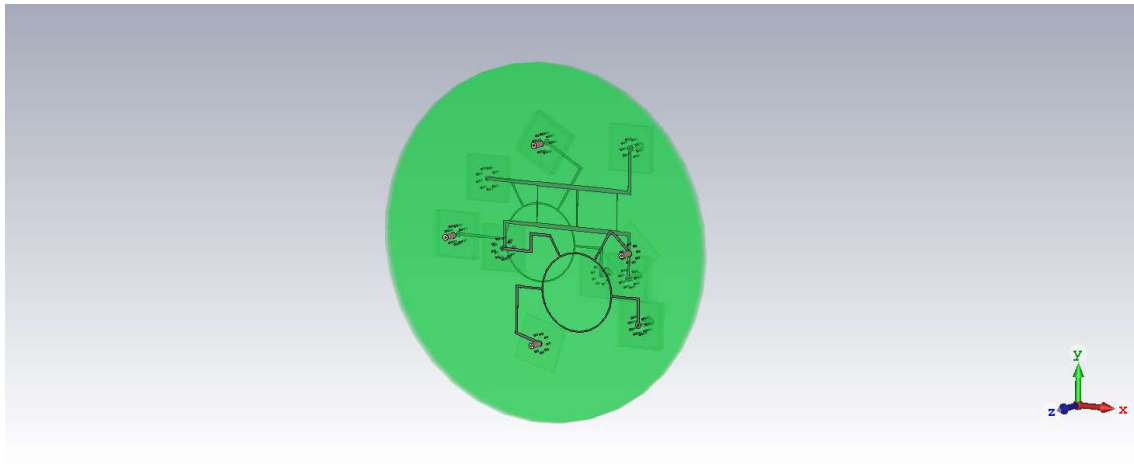


Figura 0-33: Interior de la red final unida CST

La red de alimentación completa incluye todos los circuitos unidos del Branch-Line y los Rat-Race, el plano de masa que se divide en varias capas y los tres niveles de sustrato, que incluyen seis planchas de dieléctrico en total. Para simular la red se han tenido en cuenta los conectores en el plano de masa inferior y superior. En dichos conectores se han establecido los puertos de guía para simular la estructura completa. El exterior de la red se muestra en la siguiente Figura 0-34.

Cabe recordar que para cada nivel de la estructura, hay dos placas de stripline del sustrato RF-35. Entre dos niveles hay un plano de masa que presentará agujeros en las zonas donde atravesen las vías. Por último, se coloca un plano de masa superior e inferior de la estructura, formando así los tres niveles de stripline.

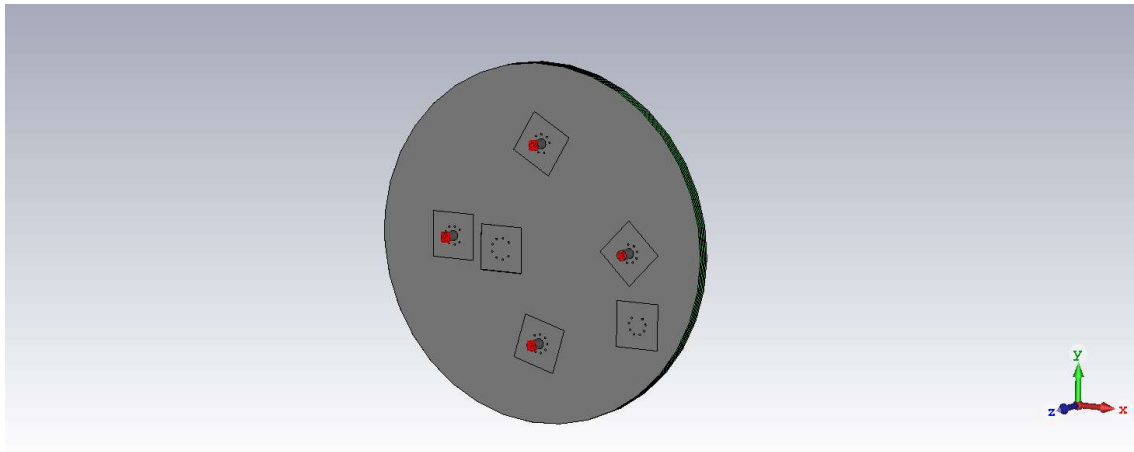


Figura 0-34: Exterior de la red final unida CST

G Vías de la red de alimentación

Como se ha comentado anteriormente, la red de alimentación al ocupar una gran extensión de espacio, es necesario diseñarla en una estructura multicapa para poder introducirla dentro de las dimensiones de la antena.

Para ello, en el TFG de Juan Pedro [1] se han diseñado una serie de vías: las simples y las dobles para atravesar la estructura y poder subir o bajar de nivel. Estas vías pueden ser sin puerto, que son las utilizadas en los niveles intermedios para pasar de un circuito a otro, o con puerto, que son las vías utilizadas para conectar la red a la antena, conectar cargas a los puertos aislados o conectar la entrada de la red de alimentación.

En este TFG ha sido necesario cambiar la impedancia de las vías intermedias y adaptar todas a 48Ω . Para ello, se ha modificado la anchura de las pistas de la vía y el radio del conector. Además, se han diseñado vías triples con puerto para poder acceder desde el híbrido Rat-Race inferior a la antena, atravesando los tres niveles de la estructura.

- Están diseñadas en tecnología planar stripline, por lo que están compuestas por plano de masa-dieléctrico-dieléctrico-plano de masa.
- Entre los dieléctricos se implementa la línea de transmisión que conecta la red de alimentación a la vía. Esta línea de transmisión, a su vez, está conectada a un círculo de un radio determinado para conseguir una buena adaptación. El círculo está unido a un cilindro macizo que conecta con el círculo superior/inferior (en función de si se sube o si se baja de nivel), o directamente se une al conector de la red (para el caso de las vías con puerto). El diámetro del cilindro está optimizado para conseguir la mejor adaptación.
- El plano de masa que es atravesado por el cilindro presenta un agujero con un radio que se ha determinado para conseguir la mejor adaptación, al igual que se ha hecho con el radio de los círculos de pista.
- La vía dispone de una serie de pines que se diseñaron en el TFG anterior teniendo en cuenta el radio de los pines y la separación entre ellos para conseguir la mejor

Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS

adaptación. Estos pines son los necesarios para unir los planos de pasa entre niveles, ya que el plano de masa es único.

Para diseñar la vía triple con puerto se ha seguido el mismo esquema de diseño que para una vía simple, pero repitiendo el proceso tres veces. De esta forma sería necesario agujerear dos planos de masa, colocar pines de alimentación en cada nivel y, por último, el conector.

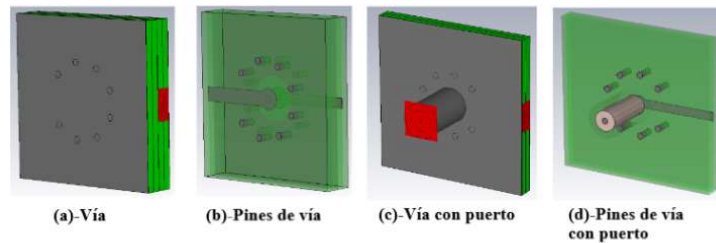


Figura 0-35: Diseño vías CST

H Materiales del proyecto

En este anexo se muestra una tabla de los materiales utilizados tanto para la red de alimentación como para el elemento radiante, ya que estos hay que tenerlos en cuenta a la hora de definir las características de los proyectos en ADS y CST y a la hora de fabricar el sistema completo. Es necesario destacar que es muy importante seleccionar correctamente con qué materiales se va a fabricar la antena y la red de alimentación, porque cada tipo ofrece unas prestaciones y unos costes diferentes. Hay que tener en cuenta la aplicación en la que se va a utilizar el elemento diseñado y los costes que se pueden asumir. Al elegir un tipo de material, es necesario definirlo en los programas porque los resultados de las simulaciones varían en función de los materiales utilizados.

Tabla 0-1: Materiales

<i>Material</i>	<i>Permitividad eléctrica (ϵ)</i>	<i>Permeabilidad magnética (μ)</i>	<i>Tangente de pérdidas (δ)</i>
<i>Vacum</i>	1	1	0
<i>Foam</i>	1.1	1	0.001
<i>Foam_Ht_80</i>	1.09	1	0.0009
<i>Teflon</i>	2.1	1	0.0002
<i>Taconic RF-35</i>	3.5	1	0.0018
<i>FR4</i>	3.9	1	0.002
<i>PEC</i>	-	-	-

I Programas utilizados

En este anexo se muestran a continuación cuáles son los programas software que se han utilizado en el proyecto, indicando sus principales características.

El primero de los programas que se han utilizado es **Advanced Design System (ADS)**. Este programa se usa frecuentemente para realizar diseños de redes de alimentación

debido a su manejo sencillo. Permite realizar modificaciones con mucha agilidad, simular circuitos en tiempo real mientras se modifican valores de impedancias y exportar archivos de fabricación.

Además, presenta una herramienta interna denominada LineCalc que se utiliza para pasar de un valor de impedancia y fase a sus respectivos valores en anchura y longitud, teniendo en cuenta las características del proyecto como la constante dieléctrica, la permeabilidad magnética, la tangente de pérdidas, etc.

El segundo programa que se ha utilizado es el **CST Studio Suite**, que es uno de los programas principales a la hora de diseñar cualquier estructura de radiofrecuencias. Es un programa de compatibilidad magnética muy completo que define con una precisión muy buena los resultados de las simulaciones de los proyectos, tanto redes de alimentación como antenas.

A diferencia del otro programa, este es mucho más difícil de manejar debido a la necesidad de parametrizar las dimensiones de los elementos que se diseñan. En cambio, la variabilidad de análisis y resultados que presenta es mucho mayor, además de una precisión más real en los resultados debido a que se tiene en cuenta la compatibilidad electromagnética de la estructura.

J Teoría de array de antenas

Se define como array de antenas, o agrupación de antenas, a todo conjunto de antenas alimentadas desde un terminal común mediante redes lineales. Los objetivos de estas estructuras son: aumentar la ganancia frente a antenas individuales y conformar el diagrama de radiación para favorecer direcciones de apuntamiento y minimizar interferencias [16].

Fijando el foco en el tipo red de alimentación, estas se pueden clasificar en arrays pasivos (de un haz o multihaz), arrays activos o arrays adaptativos.

Se puede explicar brevemente el funcionamiento de un array de antenas basándose en el principio de multiplicación de diagramas de array. Este principio define cómo radia un array de antenas indicando que el campo radiado es la suma de los campos radiados por todos los elementos del array. Hay que destacar que el array depende tanto de las corrientes de entrada a los elementos, el vector de posición de cada elemento al centro del array y el diagrama de radiación de cada elemento.

El objetivo de diseñar un array de antenas con el elemento unitario diseñado en este proyecto y anteriores, es dotar al diagrama de radiación de uno nuevo, escogiendo el ángulo para la dirección de apuntamiento del array y colocando los nulos en las direcciones de las interferencias, para así dotar al sistema de gran robustez frente al ruido e interferencias. Además, se conseguirá una mayor ganancia del sistema.

La aplicación de los arrays de antenas es muy frecuente ya que ofrecen la gran mayoría de las veces unas prestaciones mucho mejores que los elementos unitarios.

Para diseñar el array es importante estudiar en qué forma geométrica se va a implementar. Puede ser lineal, rectangular, circular, piramidal, 3D, etc.

*Diseño e implementación de una red de banda ancha (1.2 a 1.6 GHz) con rotación
secuencial para nuevas antenas de referencia de sistemas GNSS*

En las referencias [19], [20] y [22] se muestra algunas técnicas de análisis, diseño y estructuras de arrays de antenas para aplicaciones GNSS, tanto con geometrías rectangulares como circulares y circulares con un elemento central.

